

# **BIOREFINERY**

Mikroalga

Penulis:

**Hadiyanto**

**Nais P Adetya**



EF Press Digimedia  
Jl. Watulawang Timur II/9  
Gajahmungkur Semarang

# BIOREFINERY

Mikroalga

Cetakan pertama, Oktober 2018

ukuran buku : 17.5 x25

Penulis :

**HADIYANTO**

**NAIS P ADETYA**

**ISBN : 978-602-0962-53-5**



**Penerbit :**

EF Press Digimedia

Jl. Watulawang Timur II/9 Gajahmungkur Semarang

telp. 024-8501623 email: [efpressdigimedia@gmail.com](mailto:efpressdigimedia@gmail.com)

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

# KATA PENGANTAR

Sebagai negara tropis, Indonesia memiliki potensi pengembangan produk berbasis mikroalga yang sangat besar baik sebagai sumber energy maupun pangan. Dengan luas perairan yang lebih besar dari darat, maka Indonesia mempunyai diversitas spesies mikroalga yang tinggi. Dengan kandungan utamanya yaitu karbohidrat, lipid dan protein, maka mikroalga berpotensi untuk dikonversi menjadi sumber pangan dan energi melalui konsep yang disebut dengan biorefineri. Namun, produksi produk-produk dari mikroalga dalam skala besar menghadapi banyak tantangan teknis, yang membuat pertumbuhan dan perkembangan industri biorefinery mikroalga saat ini, masih tidak layak secara ekonomi. Studi ini meninjau proses-proses yang terkait dengan biorefineri mikroalga.

Buku ini memberikan pemahaman yang baik tentang penggunaan nutrient serta konversi cahaya menjadi biomassa, pemilihan jenis bioreactor mikroalga, penggunaan air limbah sebagai sumber alternatif nutrisi, dan tantangan dalam pengembangan sistem biorefineri berdasarkan mikroalga. Penulis berharap, buku ini dapat memberikan perspective tentang budidaya mikroalga dan cara mengekstrak biomasa menjadi produk yang lebih bermanfaat.

Buku ini dapat tersusun dengan baik karena bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang amat dalam kepada keluarga, sahabat, dan pihak-pihak lain yang tidak bisa penulis ucapkan satu persatu.

Penulis juga berharap kritik dan saran yang membangun untuk buku ini. Sebab, penulis sangat menyadari bahwa buku yang disusun ini masih jauh dari kesempurnaan. Semoga buku ini bermanfaat bagi kita semua.

Semarang, September 2018

**Hadiyanto**

# DAFTAR ISI

<b>CHAPTER 1 BIOREFINERI ALGA .....</b>	<b>1</b>
1.1 Definisi Biorefineri Alga .....	1
1.2 Biorefineri Mikroalga .....	2
1.3 Klasifikasi Alga dan Kegunaannya .....	7
1.4 Biohidrogen Dari Mikroalga .....	10
1.5 Produksi Bioetanol Dari Mikroalga .....	11
1.6 Produksi Biometana Secara Anaerobik .....	12
1.7 Pigmen Dari Mikroalga .....	13
1.8 Alga Sebagai Makanan dan Pakan .....	15
1.9 Alga Sebagai Obat .....	16
1.10 Alga Sebagai Pupuk .....	18
 <b>CHAPTER 2 KARAKTERISTIK PERTUMBUHAN MIKROALGA .....</b>	 <b>20</b>
2.1 Karakteristik Alga .....	20
2.2 Kondisi Lingkungan yang Mempengaruhi Pertumbuhan Mikroalga .....	23
2.3 Pertumbuhan Mikroalga .....	26
2.4 Media Kultur Mikroalga .....	28
2.5 Biosintesis Asam Lemak .....	31
 <b>CHAPTER 3 FOTOBIOREAKTOR UNTUK PENINGKATAN PRODUKSI</b>	
<b>BIOMASSA MIKROALGA: PERTIMBANGAN ANALISIS DAN DESAIN .....</b>	<b>32</b>
3.1 Pendahuluan .....	32

## **BIOREFINERY Microalga**

3.2 Parameter Desain Photobioreactor .....	33
3.3 Konfigurasi Photobioreaktor berbeda untuk budidaya mikroalga .....	43
3.4 Pemodelan dan Pengendalian .....	46
3.5 Kontrol Photobioreactor .....	48

## **CHAPTER 4 PRODUKSI BIOENERGI DARI ALGA .....**

51

4.1 Kebutuhan Bioenergi .....	51
4.2 Potensi Alga untuk produksi Bioenergi .....	52
4.3 Mikroalga Penghasil Biodiesel .....	54
4.4 Mikroalga Penghasil Bioetanol .....	56
4.5 Mikroalga Penghasil Biogas .....	59
4.6 Potensi Produksi Bioenergi dari Mikroalga secara Berkelanjutan .....	60

## **CHAPTER 5 TEKNOLOGI PEMANENAN PADA PRODUKSI**

### **BIOMASA ALGA.....**

62

5.1 Introduksi .....	62
5.2 Karakteristik Permukaan Mikroalga .....	63
5.3 Metode Pemanenan Alga .....	65

REFERENSI.....	85
----------------	----

## **Chapter 1**

# **BIOREFINERI ALGA**

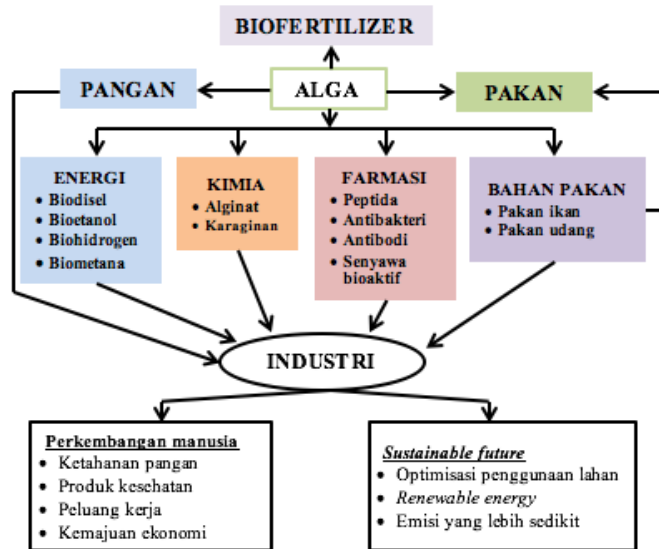
### **1.1 Definisi Biorefineri Alga**

Biorefinery merupakan proses integrasi konversi biomassa untuk menghasilkan energi dan nilai tambah. Dalam definisi yang lebih luas mengubah semua jenis biomassa (semua residu organik, tanaman energi, dan air biomassa) ke dalam berbagai produk (bahan bakar, bahan kimia, tenaga dan panas, bahan, dan makanan dan pakan) (Gambar 1). Konsep ini mirip dengan kilang minyak mentah dimana produk diproduksi di berbagai tahap penyulingan minyak bumi. Konsep biorefinery menyajikan model konseptual untuk generasi biofuel masa depan. Hal ini pada gilirannya mengurangi biaya produksi bahan bakar fosil dengan memaksimalkan pemanfaatan biomassa. Dibutuhkan proses biorefineries yang lebih efisien untuk beroperasi dimana ada pemanfaatan panas yang maksimal yang dilepaskan dari proses serta pemanfaatan biomassa sampai batas maksimal.

Serupa dengan kilang minyak bumi, biomassa digunakan sebagai bahan baku untuk produksi berbagai macam produk. Proses konversi yang berbeda (fisik, kimiawi, biologis dan termal) digunakan baik secara individu maupun kombinasi untuk menyediakan produk yang memiliki tujuan ekonomi. Produk yang diperoleh setelah konversi difraksinasi menjadi berbagai produk terpisah atau mungkin mengalami proses lebih lanjut untuk mendapatkan nilai tambah produk.

Prosesnya bisa dibuat lebih irit bila bahan baku yang adalah produk-produk sisa. Hal ini akan memberikan manfaat ganda yaitu sebagai pembangkit energy dan juga sebagai agen bioremediasi. Biorefineries juga bisa diintegrasikan dengan infrastruktur pembangkit tenaga listrik untuk menurunkan biaya produksi.

## BIOREFINERY Microalga



Gambar 1. Berbagai kegunaan alga dalam konsep biorefinery (Debrabata, 2015)

### 1.2 Biorefineri Mikroalga

Alga umumnya adalah organisme fotosintesis yang menghuni laut dan juga lingkungan air tawar. Alga memiliki keunggulan dibanding tanaman berbasis lahan karena aparatus fotosintesisnya yang sederhana serta ketersediaan air,  $\text{CO}_2$  dan nutrisi lainnya. Hal ini menyebabkan efisiensi fotosintesis alga menjadi lebih tinggi. Struktur sel yang cocok untuk fotosintesis (tidak ada akar, batang, dll.), menjadikan alga kandidat yang baik untuk akuakultur juga (John et al., 2011). Dampak lingkungan dari biofuel mikroalga secara signifikan kurang jika dibandingkan dengan biofuel tanaman konvensional. Selain itu, penggunaan mikroalga juga tidak bertabrakan dengan kebutuhan pasokan pangan dunia. Lipid yang terkandung juga sangat tinggi dan dapat tumbuh dalam berbagai variasi zona iklim (Clarens et al., 2010). Spesies alga tersebar luas dan beraneka ragam. Jenis alga bisa dipilih sesuai dengan produk yang dibutuhkan dan bisa dimanipulasi untuk meningkatkan hasil panen. Produk yang dihasilkan antara lain sumber energi (biodiesel, bioetanol, bahan bakar jet, dll.) untuk senyawa nutrisi dan biofertilizers, protein rekombinan, pigmen, obat-obatan, obat-obatan dan vaksin dapat diproduksi ganggang (Pulz, 2004; Pienkos dan Darzins, 2009). Keunggulan utama mikroalga antara lain (Campbell, 1997;



Chisti, 2007; Huntley dan Redalje, 2007; Schenk et al., 2008; Li et al., 2008; Rodolfi dkk., 2009; Khan et al., 2009):

- Efisiensi fotosintesis yang lebih tinggi (sekitar 3-8% dibandingkan 0,5% untuk tanaman terestrial), menyebabkan hasil biomassa yang lebih tinggi.
- Kemampuan penyerapan CO<sub>2</sub> yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanaman terestrial.
- Dapat tumbuh dalam medium cair sehingga mengurangi penggunaan air tawar untuk pertumbuhan, selain itu alga bisa tumbuh di air limbah serta air garam dan air payau.
- Alga bisa digunakan untuk bioremediasi karena bisa tumbuh pada berbagai macam air limbah (air limbah pertanian, kota, industri).
- Tidak ada persaingan dengan lahan subur untuk produksi pangan karena dapat memanfaatkan lahan marginal dan sempit untuk pertumbuhan.
- Biomassa alga bisa dipanen hampir sepanjang tahun.
- Induksi produk yang diinginkan (lipid, protein, karbohidrat) dimungkinkan dengan menyesuaikan kondisi budidaya yang berbeda.
- Metode pembiakan alga sangat sederhana, mudah dioperasikan dan bisa discale up untuk produktivitas biomassa yang lebih tinggi.
- Kurangnya penggunaan pupuk dan pestisida sehingga polusi yang dihasilkan lebih sedikit.
- Emisi dari biofuel berbasis ganggang mengandung jumlah NO<sub>x</sub> yang kurang (Li et al., 2008) dan menyebabkan kerusakan minimal pada lingkungan.
- Alga menghasilkan produk penyimpanan yang bisa digunakan untuk produksi biofuel: proton dan elektron (untuk biohidrogen), gula dan pati (untuk bioetanol) minyak (untuk biodiesel) dan biomassa (untuk BTL dan biometana).
- Nilai tambah co-produk juga diperoleh (protein, polisakarida, biofertilizers, pigmen, dll.).

Konversi energi cahaya menjadi energi kimia merupakan motor penggerak

## **BIOREFINERY Microalga**

untuk semua reaksi yang akhirnya mengarah pada pembentukan bahan baku yang dibutuhkan untuk formasi biofuel yang berbeda: sintesis proton dan elektron (untuk bio-H<sub>2</sub>), gula dan pati (untuk bioetanol), minyak (untuk biodiesel) dan biomassa (untuk produk BTL dan biometana) (Hankamer et al., 2007; Costa dan Morais, 2011). Biofuel yang paling layak secara teknis di pasar internasional adalah biodiesel dan bioetanol karena penggunaan keduanya tidak diperlukan modifikasi mesin dan bisa diproduksi dengan menggunakan teknologi sederhana. Dalam kasus etanol dari tebu, efisiensi energi konversi energi surya secara keseluruhan saat ini ~ 0,16% (Kheshgi et al., 2000) dan dalam kasus biodiesel dari minyak sawit ~ 0,15% (Reijnders dan Huijbregts, 2009). Persentase ini jauh lebih tinggi dari pada mengangkut biofuel dari gandum Eropa dan rapeseed (Reijnders, 2009). Baik biodiesel dan bioetanol diproduksi dalam jumlah yang meningkat sebagai biofuel terbarukan, namun produksi mereka dalam jumlah banyak tidak berkelanjutan (Chisti, 2007, 2008a, b). Perdebatan meningkatnya makanan vs bahan bakar telah menempatkan alga di garis terdepan. Mikroalga bisa menjadi solusi untuk masalah ini karena tidak menggunakan lahan garapan untuk produksi dari biofuel. Namun, biaya produksi dan perawatan yang lebih tinggi telah menghambat pertumbuhan dari mikroalga sebagai bahan baku untuk biofuel. Masalah ini bisa diatasi dengan menggunakan mikroalga dalam konsep biorefinery.

Penelitian terbaru secara intensif berfokus pada biorefineries (Taylor, 2008), dan bahan baku berbasis biomassa juga berpotensi menghasilkan industri bahan kimia yang penting (van Haveren et al., 2008). Metode yang akan dibuat pada jalur yang sama dengan kilang minyak menggunakan biomassa sebagai bahan baku awal. Minyak mineral menjadi bahan yang sangat terkonsentrasi dapat dimanfaatkan sebagai berbagai produk coproducts.

Selanjutnya, pendekatan biorefinery seharusnya tidak sama dengan pendekatan kilang minyak karena kendala saat ini pada input bahan bakar fosil dan Emisi gas rumah kaca dari unit industri ke atmosfer. Selain itu, dilingkungan industri yang dibatasi emisi, kita mungkin tidak memiliki waktu yang panjang untuk mempertahankan tingkat penyempurnaan pemrosesan yang sama dengan kilang minyak yang telah dicapai selama beberapa dekade. Pendekatan yang jauh lebih layak dan praktis untuk masalah ini adalah integrasi sumber energi terbarukan

Tabel 1. Tipe fotobioreaktor dengan fitur yang optimal (Dasgupta et al., 2010)

Tipe Foto Bioreaktor	S/V ratio	Sistem Agitasi	Kontrol Suhu	Penukar Udara	Keuntungan	Kerugian
Reactor Turbular						
Vertical Turbular	Kecil	Airlift, Bubble Coloumn	Shading, overlapping, water spraying	Buka pertukaran gas di headspace	Pencampuran yang baik, suplai CO <sub>2</sub> yang efisien dan pengangkatan O <sub>2</sub>	Scale up terbatas, lampu utama tercermin karena sudut
Horizontal Turbular	Besar	Sirkulasi ulang dengan diaphragm, pompa mekanik	Shading, overlapping, water spraying	Injeksi ke dalam pakan, dan unit degassing khusus	Sudut yang memadai menuju sinar matahari	Pelat tinggi karena pompa, risiko penumpukan O <sub>2</sub> , biofouling, unit penukar gas terpisah diperlukan
Helical Turbular	Besar	Pompa sentrifugal	Heat exchanger		S / V tinggi, mudah ditingkatkan dengan menambah jumlah unit	O <sub>2</sub> buildup, pertukaran gas terpisah, pompa Mengerahkan lebih banyak geser, puing-puing sel menumpuk di dalamnya
a-shaped reactor	besar	airlift		Injeksi pada unit vertikal dan degassed pada puncak	Aliran searah searah tinggi dengan laju alir udara rendah, tinggi S / V	Pembentukan busa karena kepadatan sel yang tinggi

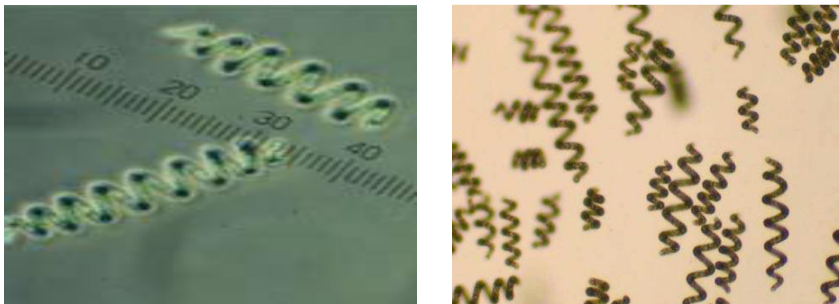
Reaktor Pelat Datar						
Panel datar bergelombang di bawah	Medium	Bubbling di bagian bawah atau dari sisi, resirkulasi	Koil penukar panas	Bubbling	Transfer gas terbuka menghindari penumpukan O <sub>2</sub>	Geser karena entrainment sel sampai gelembung pecah
Panel datar diputar pada pusat	Medium	Gerakan berdenyut	Koil penukar panas	Degasser	Pencampuran yang baik, rendah geser	Scale up susah
Bioreactor tipe floating	Medium	Gerak gerak	Tidak tersedia pendingin	-do-	Energi rendah untuk operasi, agitasi yang baik, bisa dipasang di danau dan dasar laut	
Tipe fermentor dengan pencayaan internal / eksternal	Kecil	impellers	Koil penukar panas	Dengan sparger	Tingkat kontrol yang tinggi dari berbagai parameter	Efisiensi konversi cahaya kurang
Reactor bentuk torus	Medium	Impeller marine	Kipas pendingin	Inlet CO <sub>2</sub> setelah impeller, outlet di bagian atas	Kondisi pencampuran yang baik karena bentuk menghindari zona mati	
Annular triple berjaket dengan pencayaan dari kamar paling dalam	Medium	Magnetic stirrer	Jaket air luar	Buka pertukaran gas	Baik S / V dan kontrol suhu, gas terbuka bertukar	Scaling up adalah sulit, biofouling

menjadi produksi biofuel dan pengolahan sehingga total masukan bahan bakar fosil dan emisi selanjutnya diminimalkan.

### 1.3 Klasifikasi Alga dan Kegunaannya

#### ➤ Mikroalga

Mikroalga adalah mikroorganisme (prokariotik atau eukariotik), yang mampu menghasilkan biomassa dengan proses fotosintesis yang mengasimilasi sinar matahari, air dan karbon dioksida. Waktu budidaya mikroalga bervariasi dari 24 jam sampai beberapa hari (Mata et al., 2009) dan waktu penggandaan bisa dalam beberapa jam selama periode pertumbuhan eksponensial mereka. Mereka hidup di berbagai ekosistem dan dapat ditemukan tidak hanya di air tetapi juga di lingkungan tanah. Ada 50.000 spesies mikroalga dan hanya sekitar 30.000 spesies yang telah dipelajari (Mata et al., 2009). Kemampuan mikroalga untuk tumbuh dengan cepat dan beradaptasi dengan lingkungan dan ekologi yang ekstrem menjadikannya model yang sesuai untuk tidak hanya memahami proses metabolisme dan evolusi, tapi juga pabrik miniatur untuk menghasilkan produk bernilai tambah yang bermanfaat.



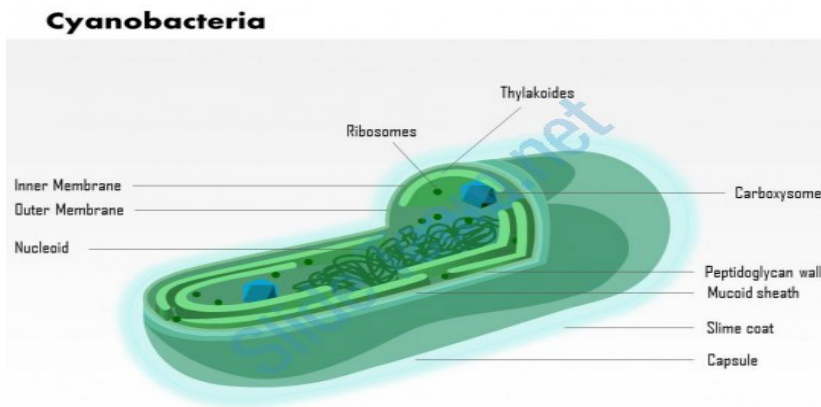
Gambar 3. Mikroalga *Spirulina platensis* (Koru, 2012)

#### ➤ Cyanobakteria

Cyanobacteria [atau *bluegreen algae* (BGA)] adalah mikroorganisme prokariotik yang dapat mengakumulasi biomassa dengan proses fotosintesis seperti mikroalga. Cyanobacteria umumnya ditemukan di sawah karena keberadaannya yang menguntungkan bagi lingkungan seperti suhu tinggi yang dibutuhkan oleh beras, pengelolaan hara dan kemampuan organisme

## BIOREFINERY Microalga

ini untuk menahan pengeringan (Mitra, 1951). BGA menyumbang rata-rata 33% dari 2.213 sampel dan beberapa laporan menunjukkan hingga 50% BGA di beberapa wilayah negara bagian selatan dan timur India (Venkataraman, 1979; Kaushik, 1995). Lebih dari 125 strain  $N_2$  memperbaiki BGA hidup bebas seperti *Anabaena*, *Nostoc*, *Aulosira*, *Calothrix*, *Tolypothrix*, *Aphanothece*, *Cylindrospermum* dan *Gloeotrichia* biasa terjadi dalam ekosistem padi gogo. Survei sawah mengungkapkan hal yang luar biasa. Perbedaan cyanobacteria yang tumbuh di tanah dan yang berada di air banjir di atas permukaan tanah (Rother dan Whitton, 1989). Tiga puluh delapan sampel tanah dari 11 kecamatan Dhaka (Bangladesh) yang dianalisis untuk flora alga hijau biru mencatat total 84 strain, 50% di antaranya dilaporkan sebagai bentuk heterogenik diazotrofik miliknya terutama untuk *Fischerella*, *Nostoc* dan *Calothrix* (Khan et al., 1994).



Gambar 4. Struktur sel *cyanobacteria* (Ali and Saleh, 2012)

### ➤ Makroalga

Makroalga adalah organisme fotosintesis eukariotik yang berbeda dari mikroalga namun masih lebih rendah dari tanaman. Lautan meliputi dua pertiga dunia, lapisan atas samudra dihuni oleh vegetasi yang didominasi oleh tumbuhan evolusioner primitif seperti makroalga (Lobban dan Harrison,

1997; Wiencke dan Bischof, 2012). Makroalga laut telah diidentifikasi sebagai kelompok organisme yang berperan penting dalam ekosistem pesisir. Makroalga membentuk hutan bawah laut yang sangat besar dengan ukuran yang cukup besar dengan struktur di pantai berbatu yang mirip dengan hutan terestrial, dan menyediakan habitat yang sangat beragam dan area pengembangbiakan untuk organisme yang tidak terhitung jumlahnya (misalnya ikan dan krustasea). Istilah “makroalga” (juga dikenal sebagai rumput laut) meliputi makroskopik, multiseluler ganggang laut hijau, coklat dan merah. Masing-masing kelompok ini merupakan organisme mikroskopik dan bahkan uniseluler. Selanjutnya, semua makroalga pada tahap tertentu dari siklus hidup mereka uniseluler seperti spora atau zigot, dan planktonik. Evolusi rumput lautnya cukup beragam dan terbagi menjadi empat divisi (atau filum) -Cyanophyta, Rhodophyta, Phaeophyta dan Chlorophyta. Makroalga terbagi ke dua atau lebih kerajaan, tergantung pada sistematika (Eubacteria, Plantae / Protista), dan sebuah kerajaan baru yang diusulkan, Chromista (untuk ganggang coklat). Pembagian rantai makanan ini, menghasilkan bahan organik dari sinar matahari, karbondioksida dan air (Wiencke dan Bischof, 2012). Daerah berlumpur dan berpasir memiliki lebih sedikit makroalga.



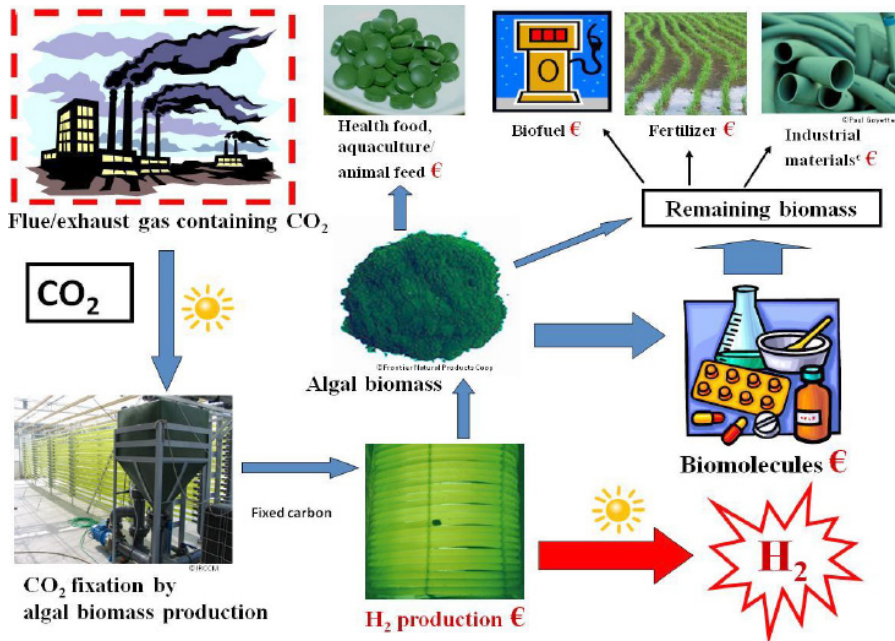
Gambar 5. Makroalga hijau *Caulerpa racemose* umumnya ditemukan di zona laut dangkal hingga kedalaman 45m (Diaz-Pulido, G. and McCook, L., 2008)

### 1.4 Biohidrogen Dari Mikroalga

Konversi biomassa alga (minyak dan /atau pemindahan pati) menjadi bio-H<sub>2</sub> oleh fermentasi gelap diatur oleh organisme anaerobik. *Enterobacter* dan *Clostridium* Strain dikenal sebagai produsen bio-H<sub>2</sub> yang baik yang mampu memanfaatkan berbagai jenis sumber karbon (Angenent et al., 2004; Das, 2009; Cantrell et al., 2008). Di sisi lain, cyanobacteria dan green algae adalah satu-satunya organisme yang dikenal mampu menghasilkan fotosintesis oksigen dan produksi bio-H<sub>2</sub>. Di cyanobacteria, hidrogen dihasilkan oleh reaksi yang bergantung pada cahaya yang dikatalisis oleh nitrogenase atau dalam kondisi anaerobik gelap oleh hidrogenase (Rao dan Hall, 1996; Hansel dan Lindblad, 1998), sedangkan pada alga hijau, hidrogen dihasilkan secara fotosintesis oleh kemampuan untuk memanfaatkan sumber energi matahari, untuk mendorong produksi H<sub>2</sub>, dari H<sub>2</sub>O (Melis et al., 2000; Ghirardi et al., 2000; Melis dan Happiness, 2001; Ran et al., 2006; Yang et al., 2010). Sampai saat ini, produksi H<sub>2</sub> telah diamati hanya 30 genera ganggang hijau (Boichenko dan Hoffmann, 1994) menyoroti potensi tersebut untuk menemukan fototrofi eukariotik penghasil H<sub>2</sub> baru dengan produksi H<sub>2</sub> yang lebih tinggi kapasitas.

Untuk produksi H<sub>2</sub> fotobiologis, cyanobacteria, yang sebelumnya disebut “ganggang hijau biru” dan bakteri “penguat nitrogen”, adalah salah satu kandidat ideal, karena mereka memiliki persyaratan gizi paling sederhana. Mereka bisa tumbuh menggunakan udara, air dan mineral garam, dengan cahaya sebagai satu-satunya sumber energi (Tamagnini et al., 2007; Lindblad et al., 2002). Faktanya, cyanobacteria (terutama mutannya) dianggap paling tinggi produsen biologis dengan biaya rendah, karena hanya membutuhkan udara (N<sub>2</sub> atau CO<sub>2</sub>), air dan garam mineral, menggunakan cahaya sebagai satu-satunya sumber energi. Produksi H<sub>2</sub> oleh cyanobacteria membutuhkan dua enzim: nitrogenase dan hidrogenase bi-directional. Dalam N<sub>2</sub>-memperbaiki strain, produksi H<sub>2</sub> bersih adalah hasil dari evolusi H<sub>2</sub> oleh nitrogenase dan Konsumsi H<sub>2</sub> terutama dikatalisis oleh hidrogenase serapan. Akibatnya, produksi Dari mutan yang kekurangan aktivitas serapan H<sub>2</sub> diperlukan. Apalagi nitrogenase itu memiliki persyaratan ATP tinggi dan ini menurunkan potensi solar efisiensi konversi energi. Di sisi lain, hidrogenase bi-directional membutuhkan energi metabolik yang jauh lebih sedikit, namun sangat sensitif terhadap oksigen (Das dan Veziroğlu, 2001; Schütz et al., 2004).





Gambar 6. Produksi biohidrogen dari mikroalga (Skjanes, 2011)

### 1.5 Produksi Bioetanol Dari Mikroalga

Mikroalga bioetanol dapat diproduksi melalui dua proses yang berbeda: melalui dark fermentasi atau fermentasi ragi. Fermentasi gelap mikroalga terdiri dari produksi anaerobik bioetanol oleh mikroalga itu sendiri melalui konsumsi dari pati intraselular. Proses fermentasi ragi sudah mapan industri dan untuk mencapai hasil yang lebih tinggi, perlu untuk menyaring strain dengan tinggi pati dan kandungan gula lainnya dan menyebabkan akumulasi pati intraselular. Beberapa mikroalga memiliki kandungan pati tinggi dan oleh karena itu berpotensi bioethanol tinggi produksi (Schenk et al., 2008; Hankamer et al., 2007). Namun, hanya penelitian terbatas (Huntley dan Redalje, 2007; Rosenberg et al., 2008; Subhadra dan Edwards, 2010) telah dilaporkan sama (Douskova et al., 2008). Telah Diperkirakan sekitar 46.760 sampai 140.290 L etanol ha<sup>-1</sup> thn<sup>-1</sup> dapat diproduksi dari mikroalga (Cheryl, 2010). Hasil ini adalah beberapa urutan besarnya lebih tinggi dari hasil panen yang diperoleh untuk bahan baku lainnya.

Matsumoto dkk. (2003) telah menyaring beberapa strain mikroalga laut

## **BIOREFINERY Microalga**

dengan kandungan karbohidrat tinggi, dan mengidentifikasi total 76 strain dengan karbohidrat konten berkisar antara 40 sampai 53%. Hirano dkk. (1997) melakukan percobaan dengan *C. vulgaris* microalga (kandungan pati 37% b / b) melalui fermentasi dan hasil panen konversi etanol 65% bila dibandingkan dengan rasio konversi teoritis dari pati Ueda dkk. (1996) menemukan bahwa mikroalga, seperti *Chlorella*, *Dunaliella*, *Chlamydomonas*, *Scenedesmus* dan *Spirulina*, mengandung sejumlah besar (> 50%) dari pati dan glikogen yang berguna sebagai bahan baku pembuatan etanol. Mikroalga dapat mengasimilasi selulosa yang dapat difermentasi menjadi bioetanol (Chen et al., 2009). Mikroalga *Chlorococum* sp. juga telah dipelajari sebagai bahan baku untuk produksi etanol (Harun et al., 2010). Produksi bioetanol dari Fermentasi biomassa mikroalga menghadirkan beberapa keuntungan tersendiri karena bias gunakan mikroalga sisa dari proses lain (misalnya ekstraksi minyak) atau biomassa utuh. Itu terjadi dalam media berair, oleh karena itu, tidak perlu menghabiskan pengeringan energy biomassa dan biomassa yang diperlukan dapat terkonsentrasi dengan hanya menetas. Itu Teknik gangguan sel kimia secara simultan dapat menghancurkan gula kompleks diperlukan untuk fermentasi ragi dan teknologi fermentasi ragi dengan baik didirikan industri.

### **1.6 Produksi Biometana Secara Anaerobik**

Bahan organik seperti biomassa tanaman atau pupuk cair dapat digunakan untuk berproduksi biogas melalui pencernaan anaerobik dan fermentasi. Campuran bakteri digunakan untuk menghidrolisis dan menghancurkan biopolimer organik (misalnya karbohidrat, lipid dan protein) menjadi monomer, yang kemudian diubah menjadi gas kaya metana melalui fermentasi (biasanya 50-75% CH<sub>4</sub>). Karbon dioksida adalah komponen utama kedua yang ditemukan di biogas (sekitar 25-50%) dan seperti kotoran pengotor lainnya, harus dikeluarkan sebelum metana digunakan untuk pembangkit listrik. Biomassa mikroalga merupakan sumber beragam komponen yang dapat dicerna secara anaerobik untuk menghasilkan biogas.

Penggunaan teknologi konversi ini menghilangkan beberapa hambatan utama yang bertanggung jawab atas tingginya biaya saat ini yang terkait dengan biofuel alga, termasuk pengeringan, ekstraksi, dan konversi bahan bakar, dan dengan demikian dapat menjadi metodologi yang hemat biaya. Beberapa penelitian telah dilakukan

yang menunjukkan potensi pendekatan ini. Menurut Sialve dkk. (2009), kandungan metana biogas dari mikroalga adalah 7 sampai 13% lebih tinggi bila dibandingkan dengan biogas dari jagung. Untuk produksi biogas, spesies mikroalga harus memiliki tingkat degradasi yang tinggi dan jumlah residu yang tidak dapat dicerna yang rendah (Mussnug et al., 2010). Substrat harus dipekatkan namun proses pengeringan harus dihindari, karena menghasilkan penurunan produksi biogas secara umum sekitar 20%. Hasil ini mewakili yang bagus karena menghemat energi dan waktu. Namun, untuk menghindari pengangkutan biomassa basah, fasilitas produksi alga dan pabrik fermentasi biogas harus sedekat mungkin (Mussnug et al., 2010). Menurut Das (1985), biomassa alga air limbah tumbuh berperan sangat penting untuk perbaikan proses biometanasi. Pencernaan anaerobik dieksplorasi dengan baik masa lalu, mungkin akan muncul kembali di tahun-tahun depan baik sebagai langkah wajib mendukung budaya mikroalga berskala besar atau sebagai proses penghasil bioenergi mandiri (Sialve et al., 2009). Teknologi ini bisa sangat efektif untuk situasi seperti itu Sebagai pengolahan air limbah terpadu, dimana ganggang ditanam di bawah kondisi yang tidak terkontrol dengan menggunakan strain yang tidak dioptimalkan untuk produksi lipid.

### **1.7 Pigmen Dari Mikroalga**

Prinsip fotosintesis serupa pada tanaman dan ganggang yang lebih tinggi, tapi alga Berlawanan dengan tanaman yang lebih tinggi sehubungan dengan keragaman pigmentasi antara ganggang laut dan keragaman rezim cahaya di lautan. Daerah cahaya yang luas disebut radiasi fotovoltaiik aktif (PAR, 350-700 nm) adalah daerah penyerapan klorofil dan pigmen pemanenan ringan lainnya. memiliki puncak penyerapan yang berbeda (Lobban dan Harrison, 1997). Klorofil-a adalah pigmen yang bertanggung jawab untuk fotosintesis, tetapi juga klorofil-b, c1 dan c2 hadir dalam makroalga. Pigmen aksesori seperti karotenoid ( $\beta$ -karoten, lutein, fucoxanthin, siphonaxanthin, violaxanthin, antheraxanthin, zeaxanthin) dan phycobilliproteins phycoerythrin merah (menyerap di daerah hijau: 495-570 nm) dan phycocyanin biru (menyerap di daerah hijau-kuning: 550 -630 nm) dapat membantu pemanenan foton dari cahaya panjang gelombang lainnya. Sejumlah besar produk alami dari potensi ekonomi dihasilkan oleh cyanobacteria. Ini juga merupakan



## **1.8 Alga Sebagai Makanan dan Pakan**

Mikroalga yaitu *Spirulina*, *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Dunaliella salina*, dan *Aphanizomenon flos-aquae* telah menemukan aplikasi untuk industri makanan. *Chlorella pyrenoidosa* bisa sangat penting bagi kesehatan manusia, karena biomassa ini mengandung protein (50-65%), lipid (5-10%), hidrokarbon (10-20%), antioksidan, vitamin C (200-500 mg kg<sup>-1</sup>) dan vitamin A (120-300 mg kg<sup>-1</sup>) (Sheng et al., 2008). Akumulasi pati mikroalga dapat dihidrolisis dengan pembentukan organik asam (Rodjaroen et al., 2007). Lipid tinggi, karbohidrat dan protein banyak Spesies mikroalga telah mendorong penelitian dalam spektrum penggunaan yang luas untuk konsumsi manusia. Mereka digunakan sebagai tablet, kapsul dan juga ditambahkan dalam saus, permen dan minuman (Yamaguchi, 1997). Analisis komposisi kimiawi kotor ini. Ekstrak alga menunjukkan adanya peningkatan sifat antioksidan dengan meningkatnya kandungan asam lemak tak jenuh (Tokusoglu dan Ünal, 2003; Becker, 2007). *Aphanizomenon flos-aquae* digunakan dalam makanan secara individu atau dengan nutrisi lainnya dan produk alami Kualitas protein rata-rata sebagian besar alga yang diperiksa sama, Kadang bahkan lebih unggul dari protein tanaman konvensional (Becker, 2007). Protein dari *Dunaliella* dapat digunakan dalam industri kue (Finney, 1984), dan biomassa dapat digunakan untuk pakan hewan dan ikan (Dufossé et al., 2005). Banyak spesies mikroalga memiliki kandungan protein lebih tinggi, rasio efisiensi protein, Nilai biologis yang nyata, nilai pencernaan protein, kandungan asam amino, proporsi dan ketersediaan asam amino dalam profil protein mereka yang memberi mereka keuntungan dibandingkan protein makanan konvensional lainnya (Becker, 2007). Ilmuwan Jepang menemukan *Chlorella* sebagai sumber asam amino esensial kecuali metionin. Asam aspartik dan glutamat ditemukan sebagai fraksi besar gugus asam amino di Indonesia rumput laut, dan rumput laut coklat seperti *Fucus* sp. Kedua asam amino ini menempati 22-44% total keluarga asam amino (Munda, 1977). Dalam rumput laut hijau total Pangsa asam aspartat dan glutamat naik menjadi 32% pada rigid *Ulva* dan *Ulva rotundata* (Fleurence et al., 1995). Diet alga, terutama ekstrak mikroalga, terdiri dari  $\omega$ -3 asam lemak untuk bayi. Keluarga asam lemak  $\omega$ -3 dan  $\omega$ -6 berlimpah di laut spesies alga, dan *Cryptocodinium cohnii* mengandung 40-50% DHA, namun kekurangan EPA dan PUFA rantai panjang lainnya (Jiang et al., 1999). EPA banyak ditemukan di *Porphyridium purpureum*,

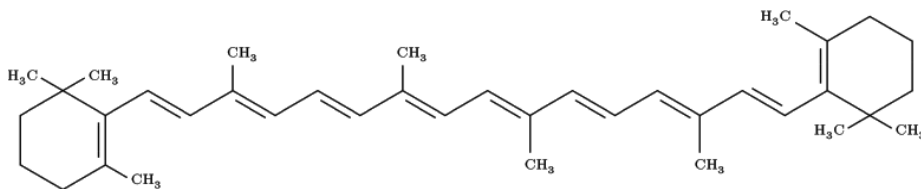
## **BIOREFINERY Microalga**

*Phaeodactylum tricornutum*, *Isochrysis galbana*, *Nannochloropsis* sp. dan *Nitzschia laevis* (Zittelli et al., 1999). Biomassa alga juga mengandung kadar vitamin yang tinggi seperti A, B1, B2, B6, B12, C, E, niotinate, asam folat, asam pantotenat dan  $\beta$ -karoten dan mineral (Becker, 2007). Kandungan mineral rumput laut (8-40%) cukup untuk memenuhi tunjangan diet yang direkomendasikan setiap hari (Ruperez, 2002). Deposisi mineral lebih rendah pada ganggang merah dan hijau dibandingkan dengan alga coklat atau pheophytes (Holdt dan Kraan, 2011). Air tawar *Chlorella* mengandung mineral 6,30% b/b sedangkan *Isochrysis* laut memiliki kadar abu lebih tinggi yaitu 16,08% b / b (Tokusoglu dan Unal, 2003). Sebagian besar alga kaya akan yodium, potassium, besi, magnesium dan kalsium (Pouličková et al., 2008), dan *Laminaria japonica* ditemukan sebagai sumber yodium yang sangat baik (Holdt dan Kraan, 2011). Mikroalga memiliki potensi untuk menjadi sumber baru molekul bioaktif. Mereka mungkin juga memiliki senyawa probiotik kuat yang meningkatkan kesehatan (Kay dan Barton, 1991).

### **1.9 Alga Sebagai Obat**

Karotenoid memiliki banyak khasiat, penting bagi industri farmasi. Antioksidan seperti  $\beta$ -karoten dan asthaxanthin adalah sumber pro-vitamin A. Asthaxanthin, banyak diproduksi dari *Haematococcus pluvialis*, sedang digunakan untuk kemungkinan perannya dalam kesehatan manusia untuk perlindungan dari sinar UV, meningkatkan kekebalan tubuh sistem dan bertindak melawan pembengkakan dan pembentukan tumor (Guedes et al., 2011; Brennan dan Owende, 2010). Phycocyanin yang sebagian besar diperoleh dari *Spirulina* memiliki aplikasi potensial dalam tujuan diagnosa di bidang kedokteran dan bioteknologi. Misalnya, sifat fluoresen yang kuat dan sangat sensitive phycocyanin dapat dieksploitasi untuk memberi label antibodi, reseptor dan biologis lainnya molekul dalam percobaan imunolabel (Bermejo Roman et al., 2002; Brennan dan Owende, 2010). Demikian pula, mikroalga memiliki karbohidrat khusus mengikat protein dalam tubuh protein sel yang disebut lektin, dan ini adalah ditemukan sangat spesifik untuk oligosakarida kompleks yang rumit, glikoprotein atau glikolipid selama penyakit (Skjånes et al., 2013). Beberapa ganggang coklat seperti Wakame, Kombu dan Mozuki ditemukan kaya akan fucoxanthin (Kanazawa, 2012). Fucoxanthin dan metabolitnya,

fucoxanthinol menunjukkan biofungsi yang beragam dan signifikan, seperti tindakan pencegahan kanker, efek anti-obesitas, peningkatan metabolisme lipid, dan potensi antioksidan. Heparinoid adalah heteropolysaccharides sulfat yang dikenal untuk tindakan antitrombotik termasuk tindakan anti-inflamasi, namun rentan terhadap kontaminasi. Namun, heparinoid diekstraksi dari ganggang laut merah *Hypnea musciformis* ditemukan memiliki tindakan antitrombotik, dan sejak itu diperoleh dari sumber kelautan, heparinoid kurang rentan terhadap kontaminasi oleh prion dan virus (Alves et al., 2012). Ekstrak alga juga terbukti efektif dalam mengendalikan pathogen aktivitas mikroba. Sebagai contoh, ekstrak hydroalcoholic dari filamentous green alga, *Cladophora glomerata* memiliki aktivitas antimikroba pada Gram negatif yang berbeda dan bakteri Gram positif termasuk *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella typhimurium* dan *Proteus mirabilis* (Soltani et al., 2011). Demikian pula ekstrak n-heksana dari *Sargassum polycystum* dan *C. agardh* memperlihatkan agen bakteriostatik yang menjanjikan terhadap banyak Gram negatif seperti *Escherichia coli*, *P. aeruginosa* dan bakteri Gram positif seperti *Staphylococcus aureus*, *B. cereus* (Chiao-Wei et al., 2011).



Gambar 8. Struktur  $\beta$ -karoten

Produksi protein rekombinan tertentu seperti vaksin, antibodi, hormone dan enzim yang menggunakan mesin alga memiliki banyak keunggulan seperti rendahnya produksi biaya, kemudahan skalabilitas, tidak adanya patogen manusia dan kemampuan melipat dan mengumpulkan protein kompleks secara akurat (Rosales-Mendoza et al., 2012). Sebagai tambahan, Ini menawarkan alternatif yang menarik untuk ekspresi berbasis mamalia tradisional sistem, karena genome plastida dan nuklir dengan mudah dan cepat berubah. Karena itu, kloroplas bisa dijadikan pabrik untuk produksi antibiotic (Tran et al., 2009), protein reporter, protein mamalia bioaktif dan farmasi lainnya protein penting Misalnya, Franklin dan Mayfield

(2005) menyatakan Antibodi IgA manusia diarahkan melawan virus herpes simpleks pada eukariotik uniseluler ganggang hijau, *Chlamydomonas reinhardtii*.

### 1.10 Alga Sebagai Pupuk

Pentingnya pertanian ganggang bluegreen (BGA) terletak pada kapasitasnya memetabolisme nitrogen molekuler, pembebasan sebagian nitrogen dan pertumbuhan tetap mempromosikan zat sebagai metabolit ekstra, melarutkan fosfat yang tidak larut, penambahan bahan organik dan memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah. Heterocysts BGA adalah stasiun penguat nitrogen dari alga heterokonomis. Nonheterocystous bentuk BGA fix nitrogen secara anaerobik. Nitrogen ditetapkan oleh BGA mungkin tersedia untuk tanaman (misalnya beras) hanya setelah diluncurkan secara ekstraselular ke lingkungan sekitar, baik sebagai produk ekstraselular atau oleh mineralisasi intraselulernya. Isi melalui dekomposisi mikroba setelah kematian (Srinivasan, 1978). Fiksasi Nitrogen (N) oleh BGA dan pelepasannya dalam sistem air tanah bisa terjadi lebih berguna untuk produksi tanaman pangan pada tahap pertumbuhan vegetatif tanaman padi dibandingkan dengan tahap selanjutnya (Roger et al., 1993). Pemulihan cyanobacterial tetap N dengan nasi bervariasi 13-50% tergantung dari sifat inokulum, metode aplikasi dan tidak adanya fauna tanah di tanah yang diinokulasi (Tirol et al., 1982). Studi lapangan di BGA asli dengan adanya urea super granul dan urea (87 kg N ha<sup>-1</sup>), ammonium sulfat (58 kg N ha<sup>-1</sup>), SSP (30 kg ha<sup>-1</sup>), kalium (20 kg ha<sup>-1</sup>) dan Zn (10 kg ha<sup>-1</sup>) menunjukkan bahwa aplikasi permukaan pupuk nitrogen menghambat nitrogen fiksasi, sedangkan penempatan urea dalam meningkatkan aktivitas pengikatan nitrogen 70% sebagai dibandingkan dengan kontrol. Selain itu, BGA juga didorong oleh siaran permukaan yang meningkatkan pH air banjir dan hilangnya nitrogen akibat amonia penguapan. Fiksasi nitrogen BGA memiliki mekanisme 'switch on' yang diaktifkan Bila tingkat gabungan nitrogen turun di bawah ambang batas (~ 40 ppm). Di Selain itu, cyanobacteria memetabolisme karbon dioksida atmosfer selama fotosintesis. Aplikasi pupuk kimia pada tingkat yang disarankan atau yang lebih rendah tingkat merangsang pertumbuhan populasi hezotrofik cyanobacterial dan nitrogenase aktivitas di sawah sedangkan kadar pupuk yang lebih tinggi terbukti bersifat hambat (Jha et al., 2001). Rotasi tanaman beras-mustard-mung



diamati lebih sesuai untuk fiksasi nitrogen cyanobacterial dibandingkan rotasi beras-jagung-jagung. Rendahnya kesuburan ditambah dengan rotasi beras-mustard-mung ternyata paling cocok untuk dipromosikan fiksasi nitrogen oleh cyanobacteria selama budidaya padi (Jha et al., 2001).

**Chapter 2****KARAKTERISTIK  
PERTUMBUHAN  
MIKROALGA****2.1 Karakteristik alga**

Mikroalga adalah organisme tumbuhan paling primitif berukuran seluler yang umumnya dikenal dengan sebutan nama fitoplankton. Habitat hidupnya adalah wilayah perairan di seluruh dunia. Habitat hidup mikroalga adalah perairan atau tempat – tempat lembab. Organisme ini merupakan produsen primer perairan yang mampu berfotosintesis layaknya tumbuhan tingkat tinggi lainnya. Mikroalga berperan penting dalam jaring – jaring makanan di laut dan merupakan materi organik dalam sedimen laut, sehingga diyakini sebagai salah satu komponen dasar pembentukan minyak bumi dasar laut yang dikenal sebagai *fossil fuel* (Kawaroe *et al.*, 2010).

Tabel 2 menunjukkan pandangan mikroskopik beberapa strain alga potensial yang telah dipelajari sebagai organisme model pada skala laboratorium dan skala pilot. Studi terbaru menunjukkan bahwa alga hijau adalah spesies yang menjanjikan memiliki potensi substansial untuk mendapatkan berbagai produk dalam konsep biorefinery (Suali dan Sarbatly, 2012). Minyak alga dapat di transesterifikasi menjadi metil ester asam lemak (FAME) dan komponen non-lipid biomassa alga seperti karbohidrat dan protein dapat digunakan untuk produksi bioetanol, biobutanol, neutraceuticals dan pakan ternak (Kirrolia *et al.*, 2013).

Menurut Kawaroe *et al.* (2010), secara umum mikroalga dapat dibagi ke dalam empat kelompok utama:

- a) *Chlorophyceae* (Alga hijau)

*Chlorophyceae* adalah alga hijau yang berasal dari filum *Chlorophyta*

dan selnya mengandung klorofil A dan B. Produk yang dihasilkan dari alga ini adalah berupa kanji (amilosa dan amilopektin), beberapa dapat menghasilkan produk berupa minyak. Beberapa mikroalga yang merupakan dalam kelas *Chlorophyceae* adalah: *Tetraselmis chuii*, *Nannochloropsis oculata*, *Spyrogyra* sp., *Scenedesmus* sp. dan *Chlorella* sp.

b) *Bacillariophyceae* (Diatom)

*Bacillariophyceae* atau yang dikenal dengan nama Diatom adalah alga yang berasal dari filum *Chrysophyta*. Kelas ini mendominasi jumlah fitoplankton di laut dan sering ditemukan dalam perairan tawar dan payau, hidupnya ada uniseluler dan koloni. Mikroalga ini mudah dikenali karena selnya kapsul seperti gelas dan pergerakannya tidak jelas. *Bacillariophyceae* memiliki berbagai pigmen klorofil termasuk karotenoida serta pigmen khusus yang disebut *diatomin*. Beberapa mikroalga yang merupakan dalam kelas *Bacillariophyceae* adalah: *Phaeodactylum tricornutum*, *Cyclotella* sp., *Navicula* sp., dan *Chaetoceros gracilis*.

c) *Cyanophyceae* (Alga Biru-Hijau)

*Cyanophyceae* atau alga biru hijau termasuk dalam filum *Cyanophyta* yang memiliki kombinasi klorofil berwarna hijau dan fikosianin berwarna biru. Adanya kombinasi dari pigmen klorofil, karotenoida, fikosianin, dan fikoerithin dalam jumlah yang berbeda – beda di dalam tubuh mikroalga ini, akan memunculkan aneka warna seperti merah, hijau terang, coklat, ungu bahkan hitam. *Cyanobacteria* adalah organisme prokariotik yang tidak memiliki nukleus dan organel (kloroplas, mitokondria). Beberapa mikroalga yang merupakan dalam kelas *Cyanophyceae* adalah: *Spirulina* sp., *Nostoc comune*, *Chroococcus* sp.

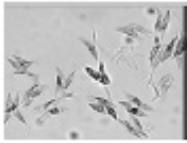

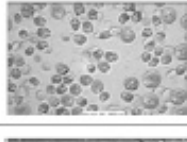
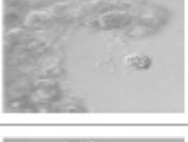
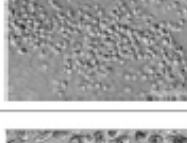




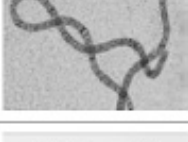


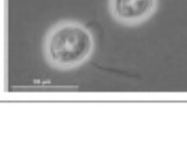

d) *Chrysophyceae* (Alga perang)

Alga ini merupakan kombinasi antara dua pigmen, yaitu keemasan (pigmen karoten) dan klorofil (pigmen hijau). *Chrysophyceae* adalah nama latin dari alga coklat keemasan atau kadang dikenal sebagai alga kuning keemasan, terdiri dari sekitar 200 genus dan 1.000 spesies. Alga

## BIOREFINERY Microalga

ini memiliki pigmen korofil keemasan (karotenoid disebut fukosantin) yang memberi warna kuning keemasan pada alga. Tubuh ada yang bersel satu dan bentuk koloni yang hidup berenang atau mengambang di danau dan laut sebagai fitoplankton. Mikroalga yang merupakan dalam kelas *Chrysophyceae* adalah: *Ochromonas* sp.

Tabel 2. Gambaran mikroskopik dari beberapa alga (Debrabata, 2015)

Microorganisms	Microscopic picture	Microorganisms	Microscopic picture
<i>Scenedesmosus</i> sp.		<i>Nitzschia</i> sp.	
<i>Chlorella</i> sp.		<i>Chloromonas</i> sp.	
<i>Nannochloropsis</i> sp.		<i>Botryococcus</i> sp.	
<i>Dunaliella</i> sp.		<i>Chlamydomonas</i> sp.	
<i>Micractinium</i> sp.		<i>Spirulina</i> sp.	
<i>Ourococcus</i> sp.		<i>Anabaena</i> sp.	
<i>Pavlova</i> sp.		<i>Tetraselmis</i> sp.	

## 2.2 Kondisi Lingkungan yang Mempengaruhi Pertumbuhan Mikroalga

Menurut Kawaroe *et al.*, (2010), komunitas mikroalga pada suatu perairan dipengaruhi oleh kondisi lingkungan antara lain temperatur (suhu), nutrien (unsur hara), intensitas cahaya, derajat keasaman (pH), aerasi (sumber CO<sub>2</sub>), dan salinitas.

### ➤ Suhu

Suhu optimal untuk kultivasi mikroalga antara 24-30°C, dan bisa berbeda-beda tergantung lokasi, komposisi media yang digunakan serta jenis mikroalga yang dikultivasi (Isnansetyo dan Kurniastuty, 1995). Namun sebagian besar mikroalga dapat mentoleransikan suhu antara 16-35°C. Temperatur di bawah 16°C dapat memperlambat pertumbuhan dan suhu 35°C dapat menimbulkan kematian pada beberapa spesies mikroalga.

### ➤ Nutrien (Unsur Hara)

Unsur hara yang dibutuhkan mikroalga terdiri dari mikronutrien dan makronutrien. Makronutrien antara lain C, H, N, P, K, S, Mg, dan Ca. Mikronutrien yang dibutuhkan antara lain adalah Fe, Cu, Mn, Zn, Co, Mo, Bo, Vn, dan Si. Diantara nutrien tersebut, N dan P sering menjadi faktor pembatas pertumbuhan mikroalga. Khusus bagi mikroalga yang memiliki kerangka dinding sel yang mengandung silikat, misalnya diatom, unsur Si berperan sebagai faktor pembatas.

Secara umum kurangnya nutrien pada mikroalga mempengaruhi penurunan kandungan protein, pigmen fotosintesis dan kandungan produk karbohidrat serta lemak. Unsur nitrogen (N) dan fosfor (P) merupakan unsur hara (nutrisi) yang diperlukan oleh flora (tumbuhan laut) untuk pertumbuhan dan perkembangan hidupnya. Unsur-unsur tersebut ada dalam bentuk nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) dan fosfat (PO<sub>4</sub><sup>-</sup>). Nitrat adalah bentuk utama nitrogen di perairan alami, nitrat sangat mudah larut dalam air dan bersifat stabil. Senyawa ini dihasilkan dari proses oksidasi sempurna senyawa nitrogen di perairan. Fosfat dijumpai dalam bentuk terikat dengan unsur lain membentuk senyawa. Di laut, fosfor dilaut terdapat pada batu karang atau endapan yang terbentuk pada

zaman geologi. Nigam *et al.* (2011), dengan mengurangi konsentrasi nitrat pada media, meningkatkan kandungan lemak yang terbentuk pada fase stasioner. Montoya *et al.* (2010), pengaruh pengurangan konsentrasi nitrat pada medium meningkatkan kandungan lemak dari 7,88% berat kering menjadi 15,86% berat kering. Penelitian yang dilakukan Widianingsih (2011), menunjukkan bahwa perubahan pengurangan prosentase nutrisi fosfat dan nitrat berpengaruh terhadap proses fisiologi mikroalga dan berdampak pada pertumbuhan dengan menghasilkan lemak sebesar 67,7% berat kering. Menurut penelitian Hu dan Gao (2006) bahwa semakin rendah konsentrasi nitrat yang berasal dari  $\text{NaNO}_3$  dan fosfat dari  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  maka kandungan lemak total pada *Nannochloropsis* sp. semakin besar dan dapat mencapai  $\pm 2,8\%$ . Griffiths dan Harrison (2009) mengatakan bahwa pada kondisi media dengan nutrisi N tercukupi, *Nannochloropsis* sp. memiliki kandungan lemak total berkisar 27-31% dan sebaliknya pada kondisi keterbatasan nutrisi N, *Nannochloropsis* sp. menghasilkan kandungan lemak total sebesar 35-46%.

### ➤ **Intensitas cahaya**

Sama seperti tumbuhan lainnya mikroalga juga melakukan fotosintesis, yaitu mengasimilasi karbon anorganik untuk dikonversi menjadi organik. Intensitas cahaya memegang peranan yang sangat penting, namun intensitas cahaya yang diperlukan tiap – tiap alga untuk dapat tumbuh secara maksimum berbeda – beda. Intensitas cahaya yang diperlukan bergantung pada volume dan densitas sel mikroalga. Semakin tinggi densitas dan volume kultivasi semakin tinggi pula intensitas cahaya yang diperlukan. Selain intensitas cahaya, fotoperiode (lama cahaya bersinar) juga memegang peranan penting sebagai pendukung pertumbuhan alga. *Nannochloropsis oculata* dapat hidup pada intensitas cahaya 2000-4000 lux. *Nannochloropsis oculata* tumbuh secara optimum pada intensitas cahaya 4000 lux dengan menghasilkan total lipid sebesar 38,32% (Budiman, 2009).

➤ **Aerasi**

Aerasi dibutuhkan untuk mencegah terjadinya pengendapan pada saat kultivasi, selain itu juga untuk memastikan bahwa semua sel mikroalga mendapat cahaya nutrisi dan udara yang sama dimanapun berada. Udara merupakan sumber karbon untuk fotosintesis dalam bentuk karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ). Gas  $\text{CO}_2$  yang masuk ke perairan akan berubah bentuk menjadi asam karbonat ( $\text{HCO}_3$ ) bergantung dari derajat keasaman (pH) air. Derajat keasaman yang optimum dapat melarutkan  $\text{CO}_2$  adalah pada kisaran 6,5 sampai 9,5. Jika pH di bawah kisaran tersebut, maka karbondioksida tetap bentuk  $\text{CO}_2$  artinya dapat cepat lepas ke atmosfer dengan demikian tidak diserap oleh mikroalga. Sebaliknya, apabila kondisi pH diatas kisaran tersebut, maka karbondioksida menjadi bikarbonat yang tidak dapat diserap oleh mikroalga.

➤ **Salinitas**

Salinitas air adalah salah satu faktor yang berpengaruh terhadap organisme air dalam mempertahankan tekanan osmotik yang baik antara protoplasma organisme dengan air sebagai lingkungan hidupnya. Beberapa jenis mikroalga yang mengalami perubahan salinitas akibat pemindahan dari lingkungan bersalinitas rendah ke tinggi akan mendapat hambatan dalam proses fotosintesis. Perubahan salinitas juga bisa terjadi ketika turun hujan.

Menurut Isnansetyo dan Kurniastuty (1995), ganggang *Phaeodactylum* sp. bertoleransi terhadap kadar garam 20-700/00 dan mengalami pertumbuhan optimal pada kisaran salinitas 350/00. *Chaetoceros* sp. memiliki kisaran salinitas sangat tinggi yaitu 6-500/00, dengan kisaran salinitas 17-250/00 sebagai salinitas optimum untuk pertumbuhannya. Sedangkan pada *Skletonema costatum* salinitas yang optimal untuk pembentukan auksospora adalah 20-350/00.

➤ **Derajat keasaman (pH)**

Proses fotosintesis merupakan proses penyerapan karbon dioksida yang terlarut di dalam air, dan berakibat panurunan  $\text{CO}_2$  terlarut

dalam air. Penurunan ini akan meningkatkan pH. Oleh karena itu, laju fotosintesis akan terbatas oleh penurunan karbon, dalam hal ini karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), perubahan bentuk karbon yang ada di perairan dan tingginya nilai pH.

### 2.3 Pertumbuhan Mikroalga

Menurut Kawaroe *et al.*, (2010) pola pertumbuhan mikroalga pada sistem kultivasi terbagi menjadi 5 tahapan (Gambar 2) yaitu, fase adaptasi (*lag phase*), fase eksponensial (*log phase*), fase penurunan pertumbuhan (*declining growth*), fase stasioner, fase kematian (*death phase*). 5 tahapan fase tersebut dijabarkan sebagai berikut:

#### ➤ **Fase adaptasi (*lag phase*)**

*Lag phase* merupakan pertumbuhan fase awal dimana penambahan kelimpahan mikroalga terjadi dalam jumlah sedikit. Fase ini mudah diobservasi pada saat kultivasi mikroalga baru saja dilakukan atau sesaat setelah bibit mikroalga dimasukkan pada media kultivasi. Pada fase ini biasanya terjadi stressing secara fisiologi karena terjadi perubahan kondisi lingkungan media kultivasi dari media awal ke media baru. Selain itu, pada media baru karena dilakukan penambahan nutrisi dan mineral maka akan mempengaruhi sintesis metabolik mikroalga karena pindah dari konsentrasi rendah ke konsentrasi tinggi. Terjadinya perubahan – perubahan semacam inilah, maka mikroalga mengalami proses penyesuaian terlebih dahulu sebelum mengalami pertumbuhan.

#### ➤ **Fase eksponensial (*log phase*)**

Fase eksponensial merupakan tahapan pertumbuhan fase pertumbuhan lanjut yang dialami mikroalga setelah fase *lag*. Mikroalga yang dikultivasi akan mengalami penambahan biomassa secara cepat. Hal ini ditunjukkan dengan penambahan jumlah sel yang sangat cepat melalui pembelahan sel mikroalga. Penambahan tersebut apabila dihitung secara matematis, maka akan membentuk fungsi logaritma. Untuk tujuan kultivasi sebaiknya mikroalga dipanen pada akhir fase eksponensial karena pada fase ini struktur sel masih berada pada



kondisi normal dan secara nutrisi terjadi keseimbangan antara nutrisi dalam media dan kandungan nutrisi dalam sel. Selain itu, umumnya pada fase akhir eksponensial, kandungan protein dalam sel sangat tinggi, sehingga kondisi mikroalga berada pada kondisi yang paling optimal untuk tujuan lebih lanjut baik sebagai bibit maupun dimanfaatkan sebagai bahan baku produk *biofuel*.

➤ **Fase penurunan pertumbuhan (*declining growth*)**

Fase penurunan pertumbuhan (*Declining Growth Phase*) terjadi dengan indikasi pengurangan kecepatan pertumbuhan sampai sama dengan fase awal pertumbuhan, yaitu kondisi yang stagnan dimana tidak terjadi penambahan sel. Pada fase ini ditandai dengan berkurangnya nutrisi dalam media, sehingga mempengaruhi kemampuan pembelahan sel yang menyebabkan jumlah sel semakin menurun. Pada fase ini juga dapat dijumpai penambahan jumlah sel akan tetapi kualitas sel memiliki nutrisi yang kurang baik. Pemanenan dapat dilakukan pada fase ini.

➤ **Fase stasioner**

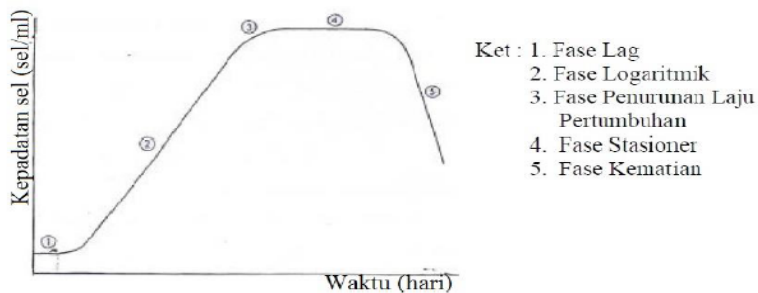
Fase stasioner diindikasikan dengan adanya pertumbuhan mikroalga yang terjadi secara konstan akibat dari keseimbangan katabolisme dan anabolisme di dalam sel. Fase ini ditandai dengan rendahnya tingkat nutrisi dalam sel mikroalga. Umumnya untuk kelimpahan yang rendah dalam kultivasi terjadi fase *stationery* yang pendek, sehingga menyulitkan pada saat pemanenan.

➤ **Fase kematian (*death phase*)**

Fase kematian diindikasikan oleh kematian sel mikroba yang terjadi karena adanya perubahan kualitas air ke arah yang buruk, penurunan kandungan nutrisi dalam media kultivasi dan kemampuan metabolisme mikroalga yang menurun akibat dari umur yang sudah tua. Kenyataan ini biasanya ditandai dengan penurunan jumlah sel yang cepat dan secara morfologi pada fase ini mikroalga banyak mengalami kematian dibandingkan dengan melakukan pertumbuhan melalui pembelahan. Warna air media kultivasi berubah, terjadi buih di permukaan media

## BIOREFINERY Microalga

kultivasi dan warna yang pudar serta gumpalan mikroalga yang mengendap di dasar wadah kultivasi.



Gambar 2. Fase Pertumbuhan Mikroalga (Kawaroe *et al.*, 2010)

Gambar 9. Fase Pertumbuhan Mikroalga (Kawaroe *et al.*, 2010)

### 2.4 Media Kultur Mikroalga

Menurut Sylvester *et al.*, 2002, budidaya mikroalga media kultur digunakan sebagai tempat untuk tumbuh dan berkembangbiak. Fitoplankton untuk kehidupannya memerlukan bahan – bahan organik dan anorganik yang diambil dari lingkungannya. Bahan – bahan tersebut dinamakan nutrien, sedangkan penyerapannya disebut nutrisi. Bahan – bahan yang diserap kedalam sel akan digunakan oleh sel melalui proses yang disebut metabolisme. Pada proses bioenergi, nutrien berfungsi sebagai sumber energi atau penerimaan elektron. Energi yang dihasilkan berupa energi kimia yang berfungsi untuk aktifitas sel misalnya perkembangbiakan, pembentukan spora, pergerakan, biosintesis dan sebagainya. Pada biosintesis, nutrien berfungsi sebagai bahan baku, tanpa adanya nutrien proses biosintesis tidak berjalan. Susunan bahan baik bahan alami maupun bahan buatan yang digunakan untuk berkembang dan perkembangbiakan mikroba dinamakan media. Media yang digunakan dalam budidaya fitoplankton berbentuk cair yang di dalamnya terkandung senyawa kimia yang merupakan sumber nutrien untuk keperluan hidupnya. Pertumbuhan dan perkembangan fitoplankton memerlukan berbagai nutrien yang diabsorpsi dari luar (media). Hal ini berarti ketersediaan unsur makro nutrien dan mikro nutrient dalam media tumbuhnya mutlak diperlukan.

Unsur nutrien yang diperlukan fitoplankton dalam jumlah besar yang disebut

makro nutrisi adalah : nitrogen, fosfor, besi, sulfur, magnesium, kalium dan kalsium. Unsur hara yang dibutuhkan dalam jumlah yang relatif sedikit disebut mikro nutrisi adalah : tembaga, mangan, seng, boron, molibdenum dan kobalt.

Ada beberapa jenis media yang digunakan untuk pertumbuhan mikroalga salah satunya adalah media Guillard. Pada Penelitian Vega (2010), Hufa (Highly Polyunsaturated Fatty Acid) tertinggi pada *Chaetoceros muelleri* ada di media Guillard (8,65%) dan pada pertanian (5,78%), selanjutnya pada penelitian Endar *et al.*, (2012), total asam lemak pada Guillard lebih banyak dari Walne, 10 dari 12 asam lemak tertinggi dalam *Skeletonema* sp. diperoleh dengan media Guillard, sehingga media ini cocok untuk memperoleh kadar asam lemak yang tinggi. Berikut merupakan Komposisi *Trace Element Solution* (Tabel 3) dan komposisi media Guillard (Tabel 4) :

Tabel 3. Komposisi *Trace Element Solution* (Jati *et al.*, 2012)

Nutrisi	Jumlah
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	
1 g	
$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.63 g
$\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.98 g
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.6 g
Aquades	100 ml

Tabel 4. Komposisi Media *Guillard* (Jati *et al.*, 2012)

Nutrisi	Jumlah
$\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	10 g
$\text{NaNO}_3$	84.2 g
$\text{Na}_2\text{EDTA}$	10 g
$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	50 g
$\text{MnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0.36 g
$\text{FeCl}_3$	2.9 g
Aquades	1000 ml
<i>Trace element solution</i>	1 ml

#### 2.4.1 Unsur makro nutrient

##### a) Nitrogen (N)

Unsur N merupakan komponen utama dari protein sel yang

## BIOREFINERY Microalga

merupakan bagian dasar kehidupan organisme. Nitrogen yang dibutuhkan untuk media kultur terdiri dari beberapa substansi yaitu:  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  (urea) dan lain – lain.

b) Fosfor (P)

Unsur P sangat dibutuhkan dalam proses protoplasma dan inti sel, Fosfor juga merupakan bahan dasar pembentukan asam nukleat, fosfolipida, enzim dan vitamin. Dengan demikian fosfor sangat berperan nyata dalam semua aktifitas kehidupan fitoplankton. Fosfor yang dibutuhkan untuk fitoplankton dapat diperoleh dari:  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{Ca}_3\text{PO}_4$  dan lain – lain.

c) Besi (Fe)

Unsur Fe berperan penting dalam pembentukan kloroplas dan sebagai komponen esensial dalam proses oksidasi. Pada kultur fitoplankton besi dapat diperoleh dari:  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{FeSO}_4$ , dan  $\text{FeCaH}_5\text{O}_7$ .

d) Kalium (K)

Unsur K selain berperan dalam pembentukan protoplasma juga berperan penting dalam kegiatan metabolisme dan aktivitas lainnya. Fungsi fisiologi kalium adalah salah satu kation anorganik utama di dalam sel dan kofaktor untuk beberapa koenzim. Sumber K dapat di peroleh dari:  $\text{KCl}$ ,  $\text{KNO}_3$ , dan  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ . Unsur K juga dapat di jumpai secara melimpah dalam air laut. Dengan demikian penggunaan K sangat dibutuhkan dalam media kultur jika akan di gunakan air laut buatan.

e) Magnesium (Mg)

Unsur Mg merupakan kation sel yang utama dan bahan dasar klorofil. Kation sel yang utama, kofaktor anorganik untuk banyak reaksi enzimatik berfungsi di dalam penyatuan substrat dan enzim.

f) Sulfur (S)

Unsur S merupakan salah satu elemen penting yang dibutuhkan dalam pembentukan protein. Sulfur untuk media kultur diperoleh dari  $\text{NH}_4\text{SO}_4$ ,  $\text{CUSO}_4$ , dan lain – lain.

g) Kalium (Ca)

Unsur Ca berperan dalam penyelarasan dan pengaturan aktifitas protoplasma dan kandungan pH di dalam sel. Sumber Ca antara lain:  $\text{CaCl}_2$  dan  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ .

#### **2.4.2 Unsur *trace element* (mikro nutrien)**

Sama seperti pada tumbuhan tingkat tinggi, untuk kebutuhan hidupnya fitoplankton juga memerlukan unsur hara mikro, walaupun dibutuhkan dalam jumlah sedikit namun keberadaannya sangat mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan fitoplankton. Unsur hara mikro tersebut dalam penggunaannya pada media kultur dapat di peroleh dari: boron ( $\text{H}_2\text{BO}_2$ ), mangan ( $\text{MnCl}_2$ ), seng ( $\text{ZnCl}_2$ ), kobalt ( $\text{CoCl}_2$ ), molibdenum ( $(\text{NH}_4)_8\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), dan tembaga: ( $\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ).

### **2.5 Biosintesis Asam Lemak**

Kandungan lemak mikroalga tergantung dari jenis mikroalga dan kondisi kultur mikroalga. Lemak pada mikroalga umumnya terdiri atas asam lemak tidak jenuh, seperti linoleat, *eicosapentanoic acid* (EPA) dan *docosahexaenoic acid* (DHA). Metabolisme merupakan segala proses reaksi kimia yang terjadi di dalam mahluk hidup, mulai dari mahluk hidup bersel satu yang sangat sederhana seperti bakteri, protozoa, jamur, tumbuhan, hewan sampai kepada manusia yang susunan tubuhnya sangat kompleks. Di dalam proses ini mahluk hidup mendapat, mengubah, dan memakai senyawa kimia disekitarnya untuk mempertahankan hidupnya. Terdapat 2 fase pada metabolisme yaitu katabolisme dan anabolisme. Katabolisme adalah fase penguraian pada proses metabolisme yang menyebabkan molekul organik nutrien seperti karbohidrat, lipid dan protein dari lingkungan terurai dalam reaksi – reaksi bertahap menjadi produk akhir yang lebih kecil dan sederhana, sedangkan anabolisme yang disebut juga biosintesis, fase pembentukan atau sintesis dari metabolisme merupakan molekul pemula atau unit pembangun yang lebih kecil disusun menjadi makro molekul besar yang merupakan komponen sel. Karena biosintesis mengakibatkan peningkatan ukuran dan kompleksitas struktur, proses ini memerlukan input energi bebas yang diberikan oleh pemecahan ATP menjadi ADP dan fosfat. Biosintesis beberapa komponen sel juga memerlukan atom hidrogen yang disumbangkan oleh NADPH.

**Chapter 3****FOTOBIOREAKTOR UNTUK  
PENINGKATAN  
PRODUKSI BIOMASSA  
MIKROALGA:  
PERTIMBANGAN ANALISIS  
DAN DESAIN****3.1 PENDAHULUAN**

Produksi biomassa mikroalga memiliki sejarah panjang karena potensi bioteknologi untuk aplikasi komersial seperti produk nutraceutical bernilai tinggi (PUFA, pigmen, vitamin), nutrisi manusia, nutrisi hewan, kosmetik, pengolahan air limbah, dan lain-lain. (Spalore et al. , 2006). Baru-baru ini, mikroalga mendapat banyak perhatian sebagai sumber potensial biofuel untuk menggantikan bahan bakar fosil, dan untuk penangkapan CO<sub>2</sub> karena efisiensi fotosintesisnya yang tinggi. Banyak dari aplikasi komersial ini memerlukan sistem photobioreactor dimana monokultur biomassa mikroalga dapat dikembangkan dengan produktivitas tinggi untuk jangka waktu yang lama. Sejumlah kolam terbuka, sistem fotobioreaktor outdoor dan tertutup telah dikembangkan untuk menumbuhkan ganggang fototrofik seperti cyanobacteria dan mikroalga. Photobioreactor memfasilitasi maksimalisasi penangkapan dan konversi energi matahari, sebaiknya menggunakan sinar matahari, CO<sub>2</sub> dan air di atmosfer, hingga energi kimia yang disimpan sebagai sumber karbon organik (seperti karbohidrat dan lipida) (Pulz dan Scheinbenbogen, 1998).

Saat ini, teknologi budidaya yang digunakan di tingkat industri adalah kolam terbuka, yang lebih disukai karena biaya modal dan operasionalnya rendah. Namun terdapat beberapa kelemahan yaitu kontrol kondisi operasional yang buruk, risiko kontaminasi yang tinggi, pencampuran yang buruk, laju perpindahan massa gas-cair yang rendah, produktivitas volumetrik rendah dan kontrol suhu yang buruk (Pulz, 2001). Sedangkan fotobioreaktor memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan kolam terbuka seperti laju perpindahan massa gas-cair yang tinggi,

pengendalian kondisi operasional yang lebih baik (seperti pH, suhu, pencampuran dan penerangan), risiko kontaminasi yang rendah, produktivitas volumetrik dan areal yang tinggi. , kehilangan air rendah dan rendahnya biaya pemanenan. Photobioreaktor telah dikembangkan pada skala kecil dan besar sejak tahun 1950an dan beberapa konfigurasi desain telah diusulkan seperti tubular, plat datar, kolom gelembung dan pengangkutan udara. Upaya ilmiah dan industri yang ekstensif telah difokuskan pada pengembangan sistem kultivasi hemat biaya dan efisiensi tinggi untuk produksi budaya mikroalga densitas sel tinggi (Wang et al., 2012).

Dalam bab ini, akan dibahas prinsip-prinsip desain fotobioreaktor, faktor penting dan parameter yang mempengaruhi kinerjanya. Masalah seperti pertukaran gas, pola pencampuran, kesesuaian penyinaran, suplai hara, pH dan kontrol temperatur, konfigurasi geometris dan bahan bangunan dianggap penting.

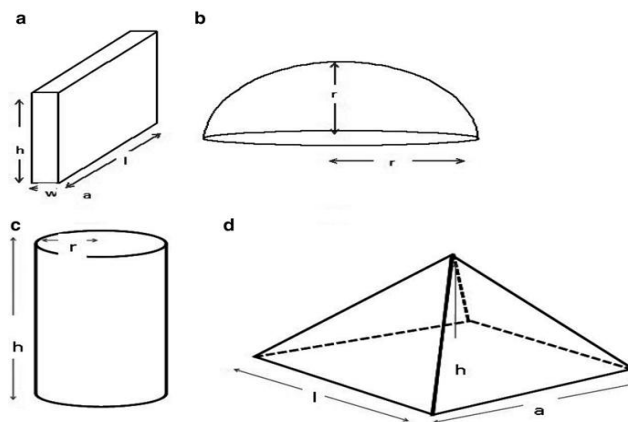
### **3.2 PARAMETER DESAIN PHOTOBIOREACTOR**

Kolam terbuka dan closed photobioreactors (PBR) adalah sistem budidaya yang digunakan untuk menumbuhkan biomassa alga. Efisiensi kinerja PBR ditentukan oleh tingkat fotosintesis, pemanfaatan cahaya, konsentrasi biomassa, pencampuran, pH dan temperatur kontrol, hidrodinamika kultur dan laju perpindahan massa. PBR yang efisien memfasilitasi dalam (1) pemanenan, distribusi dan pemanfaatan secara maksimal, (2) productivities biomassa atau produk yang tinggi, (3) pencampuran efektif dan transfer massa gas-cair, (4) memungkinkan pengendalian parameter operasional yang tepat, (5) meminimalkan biaya modal dan operasional, (6) kemudahan operasi dan skalabilitas, (7) kebutuhan lahan yang lebih rendah dan (8) konsumsi energi yang rendah selama operasi (Wang et al., 2012). Oleh karena itu, ada kebutuhan mendesak untuk desain fotobioreaktor dan strategi operasi yang dapat meningkatkan produktivitas volumetrik dan areal alga.

#### **➤ Pertimbangan Desain**

Parameter yang paling penting yang mempengaruhi desain PBR adalah penetrasi cahaya yang efektif, yang berarti rasio permukaan-ke-volume ( $S / V$ ) yang tinggi. Hal ini meningkatkan efisiensi fotosintetik, yang pada gilirannya menghasilkan produktivitas produk dan biomassa yang tinggi (Wang et al.,

2012). Ada beberapa desain PBR yang dikembangkan untuk mencapai rasio  $S / V$  yang tinggi (Gambar 6). Jenis disain utama bisa berbentuk silindris, plat datar atau tipe tubular untuk mencapai tangkap cahaya maksimal. Aspek desain penting dari sistem PBR ditunjukkan pada Tabel 5. Pilihan reaktor yang paling sesuai adalah tipe plat berbentuk tabung dan datar, mempertimbangkan rasio area-ke-volume yang tinggi sambil mempertahankan volume kerja, pola pencampuran dan transfer gas yang masuk akal. Produktivitas volumetrik ( $V_p$ ) biomassa alga atau produk ( $\text{g L}^{-1} \text{ hari}^{-1}$ ) dan produktivitas areal ( $A_p$ ) ( $\text{g m.hari}^{-1}$ ) merupakan faktor penting untuk menentukan efisiensi sistem PBR. Rasio luas area-ke-volume dari berbagai konfigurasi reaktor telah dijelaskan pada Gambar 6 dan Tabel 6. Reaktor panel datar (Gambar 6A) berbentuk bilikoid yang memiliki panjang dan tinggi yang lebar, namun lebar sempit memungkinkan penetrasi cahaya lebih besar. Reaktor panel datar juga dikategorikan menjadi reaktor vertikal atau miring (Molina Grima et al., 1999) berdasarkan orientasi mereka terhadap sinar matahari. Reaktor berbentuk kubah (Gambar 6B) berbentuk belahan dan tidak sering digunakan. Reaktor tubular (Gambar 6C) berbentuk silinder, kolom horizontal atau vertikal (Molina Grima et al., 1999). Selanjutnya, kolom vertical dibagi menjadi kolom gelembung atau reaktor angkat udara untuk karakteristik pencampuran dan perpindahan massa yang lebih baik (Sánchez Mirón et al., 2000). Reaktor piramida (Gambar 6D) juga telah dilaporkan dalam literatur.



Gambar 10. Konfigurasi desain (A) panel datar, (B) kubah, (C) tubular dan (D) bentuk piramida. H = tinggi, l = panjang, a = panjang sisi, r = jari-jari dan w = lebar reaktor.



Tabel 5. Aspek Desain Penting Dari Fotobioreaktor Terbuka Dan Tertutup

Aspek Desain PBR	System terbuka	System tertutup
Rasio Area ke Volume	Besar	Kecil
Spesies Alga	Terbatas	Fleksibel
Produktivitas	Rendah	Tinggi
Periode Kultivasi	Terbatas	Diperpanjang
Kehilangan air akibat penguapan	Tinggi	Rendah/dicegah
Efisiensi pemanenan ringan	Rendah/relatif	Relatif/sangat tinggi
Transfer gas	Rendah	Relatif/tinggi
Kontrol suhu	Tidak ada	Sangat baik
Luas lahan yang dibutuhkan	Besar	Kecil
Meningkatkan	Mudah	Mungkin
Tingkat kontrol	Rendah	Sangat baik
Penanaman Modal	kecil	Tin ggi

Tabel 6. Luas permukaan : rasio volume dari berbagai konfigurasi rasio reaktor  
area : volume

Tipe reactor	Luas permukaan yang diterangi	volume	Luas permukaan / volume
Reaktor flat panel	lh (satu sisi pencahayaan)	Lhw	$1/w$
	2lh (pencahayaan dua sisi)		$2/w$
Reaktor dome	$2\pi r^2$	$\frac{2}{3} \pi r^3$	$3/r$
Reaktor tubular	$\pi r h$ (pencahayaan sisi tunggal)	$\frac{1}{3} \pi r^2 h$	$3/r$
	$2\pi r h$ (pencahayaan dua sisi)		$6/r$
	$2\pi r_1 h_1$ * (pencahayaan annular)	$\frac{1}{3} \pi r^2 h - \frac{1}{3} \pi r_1^2 h_1$	$6r_1 h_1 - r^2 h_1$
Reaktor piramida	$al + \sqrt{\frac{a^2}{4} + h^2} + \sqrt{\frac{1^2}{4} + h^2}$	$\frac{1}{3} alh$	$\frac{3}{h} + \frac{3}{ah} \sqrt{\frac{a^2}{4} + h^2} + \frac{3}{lh} \sqrt{\frac{1^2}{4} + h^2}$

\* Pencahayaan annular adalah saat cahaya dimasukkan ke dalam reaktor.  $r_1$  dan  $h_1$  adalah dimensi sistem penerangan yang sesuai.

#### ➤ Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Produksi Alga

Selain parameter disain reaktor, faktor penting lainnya yang dapat mempengaruhi budidaya alga harus dipertimbangkan. Faktor signifikan untuk produksi alga kepadatan tinggi adalah pasokan hara, radiasi (intensitas, distribusi dan distensi spesifik), suplai CO<sub>2</sub>, penghapusan O<sub>2</sub>, pencampuran

## BIOREFINERY Microalga

dan pengendalian parameter lingkungan lainnya seperti pH, suhu, salinitas, dll.

Energi ringan: Penyediaan energi cahaya sangat penting untuk pertumbuhan ganggang fototrofik. Cahaya bertindak sebagai sumber energi untuk sel alga dan diukur dalam densitas fluks foton (I). Hal ini dapat dinyatakan dalam salah satu unit ini: lux,  $W\ m^{-2}$  dan  $\mu\ mol\ photon\ m^{-2}\ s^{-1}$ . Kepadatan fluks foton bervariasi dengan sumber cahaya dan intensitas cahaya, hubungan antara tiga unit SI yang berbeda dijelaskan pada **Tabel 7**. Total energi cahaya yang tersedia untuk pertumbuhan alga diberikan oleh Persamaan. (1), di mana kepadatan fluks foton terjadi pada area permukaan fotobioreaktor (A) yang diterangi selama durasi T (hari ke-1).

Jumlah energi yang diberikan ke alga =  $I \cdot A \cdot T$  .....(1)

Tabel 7. Interkonvensi unit kerapatan fluksi foton untuk cahaya tampak

Sumber Cahaya	$\mu\ mol\ photon\ m^{-2}\ s^{-1}$	Lux	$W\ m^{-2}$
Cahaya matahari	1	54	0,219
Lampu halide logam	1	71	0,218
Lampu neon putih sejuk	1	74	0,218
pijar	1	50	0,2

Source: Thimijan and Heins, 1983

Pengayaan nutrisi: Suplai nutrisi dibutuhkan untuk mendukung pertumbuhan primer organisme fotosintetik. Media dengan komposisi dan konsentrasi bervariasi dipasok ke sel dalam bentuk garam  $CO_2$ , air dan mineral secara makro atau mikro. Macronutrien yang dianggap penting untuk pertumbuhan normal meliputi karbohidrat, nitrogen, fosfor, kalsium, magnesium, hidrogen, sulfur, dan lain-lain. Nilai mikronutrien yang dibutuhkan meliputi besi, boron, tembaga, kobalt, manga-nese, nikel, dll. Kebutuhan nutrisi dapat ditentukan dari komposisi biomassa unsur atau stoikiometri pertumbuhan. Grobbelaar (2004) memberi rumus molekul ganggang sebagai  $CH_{1.83}O_{0.48}N_{0.11}P_{0.01}$ . Karena karbon disuplai dari karbon dioksida, dan hidrogen dan oksigen dari air, nutrisi yang membatasi tingkat adalah nitrogen dan fosfor. Rasio molar N: P sangat

penting untuk pertumbuhan sel alga dan rasio optimal yang umumnya dipasok adalah 11: 1 (N: P). Kekurangan nutrisi kritis menurunkan laju pertumbuhan sel. Kekurangan nitrogen telah dilaporkan dapat meningkatkan kadar lipid, terutama akumulasi asam lemak rantai panjang yang meningkatkan produksi biofuel. Di sisi lain, kelebihan pasokan medium dengan nutrisi meningkatkan biaya operasional. Media yang berbeda memiliki jumlah unsur hara yang bervariasi yang secara signifikan dapat mengubah jumlah biomassa sel yang dihasilkan selama kultivasi (Wang et al., 2011).

Penyediaan karbon dioksida dan pembuangan oksigen: Karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) adalah sumber carbon untuk ganggang fotoautotrofik. Agar  $\text{CO}_2$  tersedia untuk alga, maka harus terlebih dahulu dilarutkan dalam air.  $\text{CO}_2$  didominasi gas  $\text{CO}_2$  pada pH <6,  $\text{HCO}_3^-$  antara pH 6-10 dan  $\text{CO}_3^{2-}$  pada pH > 10. Dengan adanya sinar matahari,  $\text{CO}_2$  yang diserap diubah menjadi glukosa selama tahap pembatas laju pembuatan fotosintesis menggunakan enzim Rubisco. Rubisco memiliki aktivitas karboksilase dan oksigenase, dan memiliki afinitas yang lebih tinggi untuk  $\text{O}_2$  daripada  $\text{CO}_2$  (Giordano et al., 2005). Fotosintesis yang tinggi mengharuskan Rubisco untuk menggunakan  $\text{CO}_2$  untuk siklus Calvin dan bukan  $\text{O}_2$  untuk fotorespirasi. Alga karenanya telah mengembangkan mekanisme konsentrasi karbon menggunakan anhidrida karbonat di dalam sel untuk membantu fotosintesis (Bhattacharya et al., 2004). Meskipun mekanisme yang dipilih evolusi, Giordano et al. (2005) menyatakan bahwa fotorespirasi atau tingkat tinggi oksigen terlarut dapat menghambat pembentukan biomassa sekitar 50%. Jadi, untuk mempercepat laju fotosintesis,  $\text{O}_2$  yang berevolusi dihilangkan sebelum mencapai tingkat penghambatan. Pelepasan kelebihan  $\text{O}_2$  adalah masalah perpindahan massa dan dimungkinkan oleh pencampuran dan aerasi yang tepat karena konsentrasi jenuh  $\text{O}_2$  terlarut adalah 10 ppm. Namun, fotorespirasi tidak dapat dihentikan secara total karena kultur alga dapat mencapai konsentrasi  $\text{O}_2$  terlarut 40 ppm (Pulz, 2001). Oleh karena itu, diperlukan pola pelebaran dan pencampuran yang efisien untuk meningkatkan konsentrasi  $\text{CO}_2$  terlarut di dalam reaktor guna meningkatkan penyerapan  $\text{CO}_2$  oleh sel alga. Namun, peningkatan konsentrasi  $\text{CO}_2$  mengurangi pH kultur (Kumar dkk, 2011) yang

memiliki efek merugikan pada pertumbuhan alga. Oleh karena itu, jumlah pasokan  $\text{CO}_2$  yang tepat (1-5%) diberikan untuk pertumbuhan budaya produksi tinggi (Fulke et al., 2010). Sebagai alternatif, sejumlah kecil  $\text{CO}_2$  murni dapat disuntikkan ke dalam kultur mikroalga densitas sel tinggi dengan konsentrasi biomassa 8-10 g berat kering (DW)  $\text{L}^{-1}$  (Cheng-Wu et al., 2001). Teknologi berbasis membran untuk suplai  $\text{CO}_2$  selektif dan pengangkatan  $\text{O}_2$  juga menjanjikan (Pulz, 2001).

**Pencampuran:** Pencampuran yang adekuat dari budaya alga sangat penting untuk menjaga sistem kultur di lingkungan homogen, untuk meningkatkan efisiensi penangkapan ringan, penyaluran nutrisi, pertukaran gas dan transfer. Pengaruh pencampuran telah menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap produktivitas alga dan keseluruhan kinerja fotobioreaktor. Bila kondisi lingkungan tidak membatasi pertumbuhan, pencampuran memainkan peran penting untuk menciptakan pola aliran turbulensi untuk mendapatkan hasil biomassa yang tinggi. Sifat sistem pencampuran yang digunakan secara langsung mempengaruhi produktivitas sistem alga dan biaya konstruksi dan operasi (Suh dan Lee, 2003).

**Kontrol suhu:** Suhu dan pH merupakan elemen penting untuk tumbuh alga karena mereka sangat mempengaruhi struktur protein, kelarutan nutrisi dan laju pertumbuhan serapan dan alga. Laju pertumbuhan meningkat dengan kenaikan suhu / pH sampai kisaran optimal dan kemudian menurun drastis di luar kisaran ini. Dengan demikian, penggunaan pengendali diperlukan untuk mempertahankan kisaran optimal pH dan suhu untuk pertumbuhan alga. Ganggang diklasifikasikan sebagai termofilik (tumbuh pada suhu tinggi) dan mesofilik dalam hal toleransi suhu alga. Demikian pula, ganggang alifatik, alifatik, netral dan alkalofilik ada dalam toleransi pH. Salinitas mempengaruhi tekanan osmotik dalam sel alga dan bergantung pada habitat suatu spesies. Beberapa spesies adalah halophiles, yaitu memiliki toleransi tinggi terhadap garam.

### ➤ Parameter Evaluasi Kinerja Photobioreaktor

Kinerja berbagai fotobioreaktor dapat dinilai dengan menentukan nilai

parameter kritis. Parameter berikut membantu menentukan kinerja fotobioreaktor untuk pembiakan mikroalga.

Produktivitas volumetrik,  $P_X$  ( $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ): dapat didefinisikan sebagai konsentrasi sel per satuan volume reaktor per satuan waktu. Ini dihitung dari:

$$P_X = \frac{(C_f - C_i)}{t} \dots\dots\dots (2)$$

$C_f$  dan  $C_i$  adalah konsentrasi biomassa kering akhir dan awal ( $\text{g L}^{-1}$ ) yang diukur selama periode waktu tertentu,  $t$  (d) untuk uji batch.

Produktivitas itak ( $A_x$ ) ( $\text{g m}^{-2} \text{hari}^{-1}$ ): dapat didefinisikan sebagai produktivitas per unit daerah pendudukan per unit waktu. Hal ini dapat dilaporkan sebagai gram per meter persegi, ton per hektar, ton per hektar  $\text{gm}^{-2}$ . Tingkat fiksasi karbon dioksida,  $F$  ( $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ) dapat dihitung dari:

$$F = a P_x \dots\dots\dots (3)$$

dimana  $a$  = karbon dioksida ditetapkan oleh biomassa unit (dianggap 50% karbon dalam biomassa) jadi,

$$a = 0,5 \frac{44}{12} = 1,833 \text{ g CO}_2 (\text{g dry cell}^{-1}) \dots\dots\dots (4)$$

Efisiensi Photosynthetic (PE): dapat didefinisikan sebagai energi yang tersimpan dalam biomassa per unit energi cahaya yang dipasok (Hu dan Richmond, 1996).

$$PE = Y_{X/E} \frac{\Delta H_X}{N h \nu} \dots\dots\dots (5)$$

dimana  $H_X$  = kandungan energi spesifik dari biomassa,  $N$  = nomor Avogadro dan  $h \nu$  = energi foton rata-rata PAR sesuai dengan hukum Planck.

$Y_{X/E}$  didefinisikan sebagai rasio antara tingkat produksi biomassa dan iradiasi yang diserap oleh kultur dan dinyatakan sebagai massa kering mikroalga per mol foton:

$$Y_{X/E} = \frac{\mu \cdot V}{I^0 A a_x} \dots\dots\dots(6)$$

dimana  $\mu$  adalah laju pertumbuhan spesifik,  $V$  = volume kultur,  $A$  = permukaan iradiasi, dan  $a_x^*$  = koefisien penyerapan biomassa spesifik (dinyatakan sebagai  $m^2g^{-1}$ ).

Waktu pencampuran: Ini adalah parameter yang sangat penting dalam merancang PBR untuk penyerapan  $CO_2$  yang efektif oleh mikroalga. Ini didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan untuk mencapai campuran homog-enous setelah injeksi larutan pelacak (Ugwu et al., 2008). Sementara pencampuran yang baik meningkatkan transfer massa gas-cair, mengurangi penghambatan foto dan meningkatkan hasil biomassa pada energi cahaya dengan mengurangi siklus terang / gelap dan karenanya meningkatkan kinerja reaktor (Hu dan Richmond, 1996), hasil pencampuran yang buruk dalam pembentukan oksigen (penghambatan ke sel mikroalga), biofouling dll. Hal ini dihitung dengan memperkirakan waktu yang dibutuhkan oleh pewarna pelacak untuk melintasi reaktor.

Sheer stress: Dengan mikroalga yang paling besar, laju pertumbuhan meningkat dengan meningkatnya laju aerasi karena distribusi cahaya atau  $CO_2$  yang seragam. Tapi setelah tingkat turbulensi yang optimal, pertumbuhan mulai menurun seiring dengan meningkatnya kecepatan gas superfisial (Silva et al., 1987). Hal ini diyakini disebabkan oleh kerusakan sel akibat pecahnya gelembung pada permukaan sel.

Penumpukan gas: Hal ini ditentukan dengan mengukur tinggi cairan aerasi dibandingkan dengan tingkat cairan bebas gas. Hal ini dapat dinyatakan secara analitis sebagai rasio kecepatan gas superfisial  $U_G$  terhadap kecepatan kenaikan terminal rata-rata  $U_T$  dari gelembung gas:

$$\epsilon = \frac{U_G}{U_T} \dots\dots\dots(7)$$

Persamaan ini pada dasarnya muncul dari definisi gas hold up yaitu:

$$\varepsilon = \dots\dots\dots (8)$$

dimana AG dan A adalah luas penampang aktual atau benar untuk aliran gas dan total penampang saluran aliran gas-cair masing-masing. Juga pengukuran tekanan gas harus dikaitkan dengan input daya tertentu; oleh karena itu meningkat dengan input daya dan sebaliknya. Persamaan berikut menggambarkan bagaimana kinerja kolom gelembung dan reaktor angkat udara bergantung pada tekanan gas (Chisti dan Moo-Young, 1989).

$$\text{Mass Transfer } k_L \cdot a_L = \psi \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{Gas-Cair area antarmuka yang spesifik, } a_L = \frac{6\varepsilon}{dB(1-\varepsilon)} \dots\dots\dots (10)$$

dimana  $k_L$  = koefisien perpindahan massa ( $\text{ms}^{-1}$ ),  $a_L$  = daerah antarmuka per unit arus voli cair ( $\text{m}^{-1}$ ),  $\psi$  = konstanta ( $\text{s}^{-1}$ ),  $\varepsilon$  = tekanan gas keseluruhan dan  $dB$  = diameter gelembung rata-rata (m).

Hidrodinamika aliran dalam kolom horisontal dan vertikal sangat berbeda. Sedangkan kolom pengangkutan udara dan kolom yang terbuang gas memiliki tahanan gas yang lebih besar, reaktor tubular horisontal memiliki ukuran yang lebih kecil atau hampir bebas dari gas atau gelembung. Oleh karena itu aliran reaktor vertikal lebih bergejolak dan kacau. Perbedaan dalam menahan gas dan ukuran gelembung mempengaruhi penetrasi cahaya, perpindahan massa, pencampuran dan tegangan geser dan oleh karena itu sebagian besar terkait dengan hidrodinamika sistem penggumpalan alga di fotobioreaktor rekayasa (Sánchez et al., 1999).

Koefisien perpindahan massa volumetrik,  $kLa$ : Ini adalah parameter yang paling penting untuk menilai kinerja fotobioreaktor untuk mencapai pertumbuhan sel mikroalga optimal. Ini melibatkan sistem transfer massa tiga fasa: gas ( $\text{CO}_2$  (g)) - cairan (medium kultur) - padat (sel mikroalga). Koefisien perpindahan massa volumetrik ( $kLa$ ) adalah produk koefisien perpindahan massa ( $k_L$ ) dan daerah antarmuka per satuan volume reaktor aerasi. Dengan demikian, hal ini dipengaruhi terutama oleh kecepatan gas superfisial, jenis

## BIOREFINERY Microalga

sparger, tingkat agitasi, suhu dan sebagainya. (Ugwu et al., 2008; Kumar et al., 2011). Transfer massa dari fase gas ke fase cair diberikan dengan persamaan berikut:

$$= \frac{dC}{dt} = k_L a (C^* - C), \dots \dots \dots (11)$$

Dimana  $\frac{dC}{dt}$  = nilai transfer massa,  $k_L$  = koefisien transfer massa,  $a$  = area

antarmuka,  $C^*$  = konsentrasi gas ekuilibrium pada antarmuka gas dan cairan,  $C$  = konsentrasi gas dalam cairan

$k_L a$  digunakan untuk menggambarkan keseluruhan koefisien perpindahan massa volumetrik pada foto-bioreaktor.  $k_L a$  meningkat secara linier dengan kenaikan kecepatan gas superfisial sampai batas tertentu setelah mana tren ini mulai menurun karena koalesensi gelembung yang mengubah area antarmuka per satuan volume gas.

Tabel 8. Waktu sirkulasi cairan ( $t_c$ ) untuk konfigurasi reaktor yang berbeda

Typ Reaktor	Dimensi Reaktor	$U_g$ (ms <sup>-1</sup> )	$t_c$ (ms)
Flat Panel	LP= 1,3 cm	-	87-130
	LP= 2,6 cm	-	173-260
Bubble Coloumn	Ty= 20 cm	0,05	960
Air Lift	Ad/Ar= 0,5	0,025	35600
	Ty= 20 cm		
	hL= 500 cm	0,05	28600
	Cd= 11,8 cm		
	Ad/Ar= 0,5	0,025	43800
	Tv= 40 cm		
	hL= 1000 cm	0,5	35000
	Cb= 47,2 cm		

LP = Jalur cahaya, Tv = diameter kapal, Iklan = luas penampang downkomer, Ar = luas penampang balok, hL = tinggi cairan non aerasi, Cb = clearance bawah,  $U_g$  = kecepatan superfisial. Sumber: Janssen dkk., 2002; Barbosa et al., 2003



Rejim ringan: Untuk mencapai budaya kepadatan sel tinggi, sangat penting untuk secara efisien menggunakan intensitas cahaya yang tinggi pada fotobioreaktor. Karakteristik umum fotobioreaktor yang dioperasikan pada kepadatan sel tinggi adalah adanya gradien ringan yang menghasilkan pembentukan zona gelap dan terang pada fotobioreaktor. Sel-sel beredar melalui zona ini selama pertumbuhan dan karena itu menerima cahaya intermit-tently. Siklus waktu dan rasio antara periode terang dan gelap pada siklus menangkal-tambang efisiensi fotosintesis (PE). PBR berbeda memiliki waktu siklus bervariasi tergantung pada kecepatan gas superfisial, UG (ms<sup>-1</sup>). **Tabel 8** memberikan perbandingan waktu sirkulasi cair (tc) untuk konfigurasi reaktor yang berbeda.

Umumnya, reaktor dengan eksposur pendek terhadap intensitas cahaya tinggi dan jalur optik pendek mencapai produktivitas biomassa tinggi (Richmond, 2003). Oleh karena itu, panel datar dan reaktor kolom gelembung menjanjikan fotobioreaktor yang memiliki jalur optik pendek yang memungkinkan sirkulasi cairan cepat dan mencapai konsentrasi biomassa dan efisiensi fotosintesis yang paling tinggi. Perbandingan berbagai parameter evaluasi kinerja untuk berbagai PBR disajikan pada **Tabel 9**.

### **3.3 Konfigurasi Photobioreaktor berbeda untuk budidaya mikroalga**

Mikroalga adalah organisme fotosintesis dan dapat dibudidayakan dalam sistem terbuka seperti kolam raceway, danau, sungai atau sistem kultur tertutup yang sangat terkontrol yang disebut photobioreactors (PBRs). Kedua sistem memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Sistem terbuka biasanya lebih murah dan memiliki kapasitas produksi yang besar namun mereka memiliki kelemahan yang paling penting yaitu kontaminasi dari mikroalga atau bakteri lainnya. Sama sekali tidak ada kontrol atas kondisi cuaca, kerugian ringan dan penguapan biasa terjadi. Selain itu, kolam raceway banyak mengkonsumsi energi untuk memberikan pencampuran seragam dengan roda dayung (Richmond, 2003). Photobioreaktor tertutup memiliki kontrol proses yang lebih baik terhadap sistem terbuka dan memberikan produktivitas lebih tinggi dibandingkan dengan sistem terbuka. Ada

## BIOREFINERY Microalga

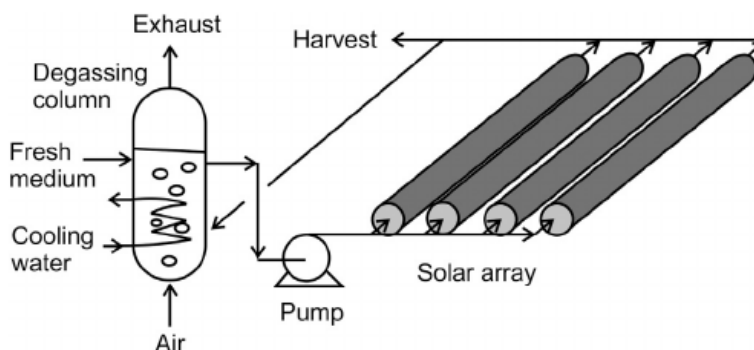
risiko kontinuitas yang berkurang, pencampuran seragam, rasio area-ke-volume yang tinggi dan efisiensi pemanfaatan cahaya yang lebih baik tercapai. Selain itu, suhu dan kontrol cahaya bisa dicapai dengan memberi lampu secara artifisial. Penjelasan singkat tentang konfigurasi photobioreaktor yang banyak digunakan untuk kultivasi mikroalga disajikan pada **Tabel 9**.

Tabel 9. Perbandingan kinerja desain albi fotobioreaktor dasar

Configuration	Species	Volume (L)	Px (g/L.d)	Ax (g/m <sup>2</sup> .d)	X (g/L)	$\mu$ (/d)	Referensi
Airlift tubular	Porphyridium cruentum	200	1,50		3,0		Camacho et al. (1999)
Vertical tubular	Cyanobium sp.	2	0,071		1,0	0,127	Henrard et al. (2011)
Vertical flat plate	Synechocystis aquatilis SI-2	192		30	1,2		Zhang et al. (2001)
Bubble column	Chlorella sp.	0,8	0,42		1,45	0,605	Chiu et al. (2008)
Airlift	Phaeod-actylum tricornutum	50	2,47		6,2		Sobczuk et al. (2000)

### ➤ Photobioreaktor Tubular (Vertikal Dan Horizontal)

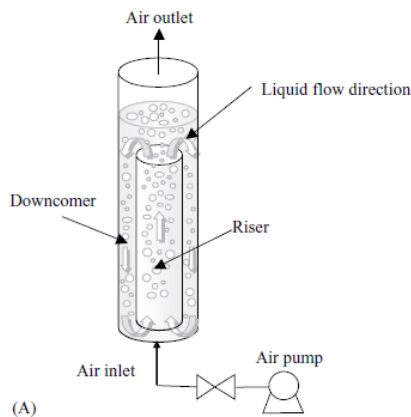
Photobioreaktor tubular paling cocok untuk penanaman alga outdoor karena tersedianya area permukaan iluminasi yang besar dalam bentuk horizontal / ser-pentine, kerucut, mirin ataupun heliks. Media kultur tersebut beredar dengan bantuan udara yang menggelegak. Masalah utama dengan jenis PBR ini adalah dalam penumpukan oksigen di dalam karena kelebihan O<sub>2</sub> adalah penghambatan pertumbuhan mikroalga (Molina Grima et al., 1999).



Gambar 11. Prinsip kerja fotobioreaktor tubular horizontal

➤ Photobioreaktor *Air-Lift*

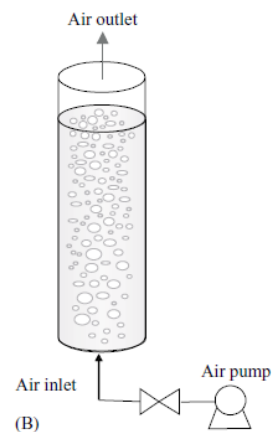
PBR udara dicirikan oleh perpindahan massa yang tinggi, pencampuran yang baik, tegangan geser rendah, kurangnya konsumsi energy dan sifat kinerja yang lebih baik lainnya yang menjadikannya pilihan yang lebih baik daripada PBR lainnya. ALR adalah reaktor kolom yang terdiri dari tabung draft bagian dalam dan tabung silinder eksternal. Gas dibebani di bagian bawah dengan bantuan alat aerasi dan cairan mengalir melalui riser dan turun sebagai riser bawah (Sánchez Mirón et al., 1999).



Gambar 12. Skematika fotobioreaktor *air-lift* (Krichnavaruk, et al., 2005)

➤ Bubble Column Photobioreactor

Reaktor kolom gelembung adalah fotobioreaktor kolom sederhana tanpa partisi internal. Gelembung naik melalui *spargers* dan melepaskan pada waktunya dengan mengurangi ukuran gelembung dan akhirnya benar-benar roboh dalam cairan. Reaktor ini harganya rendah karena instrumennya sederhana serta memberikan perpindahan panas dan massa yang relatif memuaskan (Kumar et al., 2011).

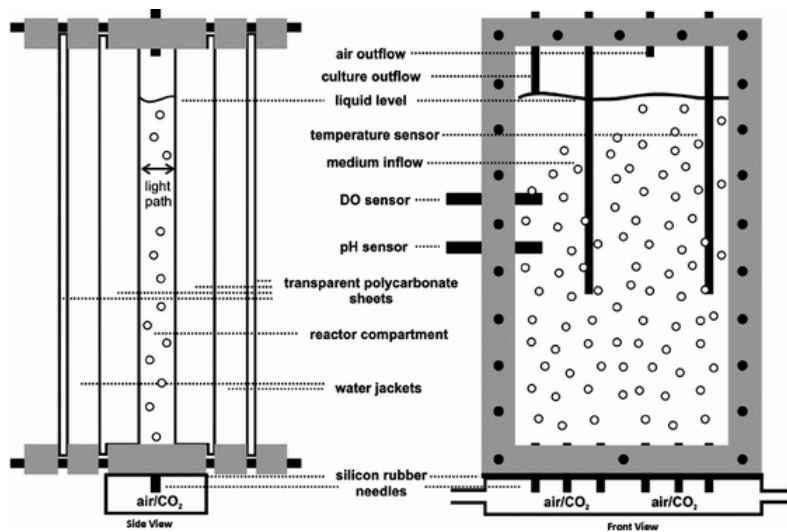


Gambar 13. Skematika fotobioreaktor *bubble column* (Krichnavaruk, et al., 2005)

## BIOREFINERY Microalga

### ➤ Photobioreaktor Panel Datar

PBR ini ditandai dengan memiliki rasio luas permukaan terhadap volume yang besar, produktivitas biomassa yang baik, jalur cahaya yang baik, penumpukan oksigen yang rendah dan zona pelepasan terbuka. Panel datar dianggap baik untuk budaya luar ruangan (Cheng-Wu et al., 2001) namun mereka mengalami kelemahan utama yaitu stres hidro-dinamis yang tinggi dan kontrol suhu yang buruk.



Gambar 14. Tampak depan dan samping dari photobioreaktor panel datar.

## 3.4 Pemodelan Dan Pengendalian

### ➤ Pemodelan Photobioreaktor

Pemodelan fotobioreaktor dirintis oleh Sheth et al. (1977). Makalah ini dan literatur yang dilaporkan lainnya telah mencoba untuk menangani ketiga masalah mendasar dalam pemodelan fotobioreaktor: (a) medan distribusi cahaya dalam fase kultur cair, (b) hidrodinamika kultur dalam hal medan iradiasi dan (c) kinetika fotosintesis sebagai fungsi penyinaran (Olivieri et al., 2014).

Hukum Lambert-Beer tidak dapat digunakan secara akurat dalam model karena tidak menggambarkan hamburan cahaya dengan cukup baik.

Namun, hukum Lambert-Beer tentang pembiasan cahaya dalam sistem buram adalah alat yang baik untuk analisis perkiraan. Medan iradiasi di fotobioreaktor digambarkan dengan baik oleh model transfer radiasi. Model ini mempertimbangkan: efek cahaya pada pertumbuhan sel, transfer cahaya yang menimpa dinding, dan penyerapan cahaya oleh pigmen fotosintesis pada sel alga. Model dua kali fluida berbasis radiasi dua dikembangkan oleh Cornet et al. (1992) menekankan pada dua parameter: koefisien penyerapan ( $E_a$ ) dan koefisien hamburan ( $E_s$ ). Selanjutnya, persamaan transfer radiasi (RTE) diselesaikan dengan mempertimbangkan jalur ringan dan konsentrasi biomassa sebagai fungsi untuk memperkirakan pembusukan iradiasi ( $I / I_0$ ) pada jarak  $z$  dari dinding PBR (Olivieri et al., 2014).

$$\frac{I(z)}{I_0} = 2 \frac{(1+\alpha)e^{-\delta(z/LP-1)} + (1-\alpha)e^{-\delta(z/LP-1)}}{(1+\alpha)^z e^{\delta} - (1-\alpha)^z e^{-\delta}}, \dots\dots\dots(12)$$

Dimana :  $\alpha = \sqrt{\frac{E_a}{E_a + E_s}}$  dan  $\delta = (E_a + E_s) \cdot \alpha \cdot X \cdot LP$

Photobioreaktor tubular dimodelkan oleh Ación Fernández et al. (1997) menggunakan persamaan (12) mempertimbangkan perubahan sudut kejadian cahaya pada permukaan tabung akibat perubahan diurnal. Selanjutnya, photobioreaktor udaralift yang dilengkapi dengan iradiasi internal dan eksternal dimodelkan oleh Li et al. dengan model dua fluks. Produktivitas ideal dihitung dari PBR volumetrically iradiasi, pada gilirannya model transfer radiasi diterapkan oleh Cornet untuk mengoptimalkan radiasi internal dalam hal distribusi ruang.

Solusi persamaan pemindahan radiatif ditingkatkan sehubungan dengan Persamaan. (12) dengan mempertimbangkan (a) spektrum cahaya; (b) pembiasan / refleksi cahaya pada permukaan gelembung gas-cair; dan (c) ukuran antenna tereduksi dari mikroalga yang dimodifikasi secara genetik (Berberoglu et al., 2007). Selanjutnya, Berberoglu dkk. (2007) memilih metode ordinat diskrit untuk memecahkan model 1D sehubungan dengan (a), (b) dan (c) fenomena. Dan kesimpulan yang ditarik adalah: (i) hamburan dapat

## **BIOREFINERY Microalga**

dianggap sebagai isotropik untuk noda liar; (ii) gelembung menghasilkan hamburan anisotropik tambahan karena area antarmuka gas-cair yang besar; dan (iii) hamburan cahaya karena sel dengan ukuran antena yang dikurangi bersifat anisotropik.

Model yang menggambarkan fotosintesis dan pertumbuhan mikroalga dapat dikelompokkan menjadi:

- i. hubungan antara tingkat pertumbuhan, radiasi dan substrat dan konsentrasi produk;
- ii. model dinamis berdasarkan unit fotosintetik (PSU);
- iii. model rinci fisiologis dan,
- iv. model skala metabolik berdasarkan urutan genom.

Ada kebutuhan untuk deskripsi kimia rinci fase cair untuk pemodelan sel mikroalga menyeluruh. Model harus menggabungkan hidrodinamika dan kinetika. Jadi, prosedur untuk menggambarkan dan menyelesaikan kasus antara mencakup persamaan diferensial parsial berbasis euler, pengenalan dinamik cahaya, pengenalan medan arus, analisis stochastic Lagrangian dan energi.

Pengembangan model fotobioreaktor terbaru meliputi analisis fenomena hidrodinamik dan perpindahan massa dengan simulasi CFD, model kinetika terstruktur yang kompleks dari pertumbuhan mikroalga dan fotosintesis, algoritma untuk menyelesaikan persamaan penyerahan radiasi untuk lapangan yang diterangi. Semua pengembangan model ini berada dalam arah untuk mendukung dan memperbaiki desain dan peningkatan photobioreaktor.

### **3.5 Kontrol Photobioreaktor**

Peran sistem kontrol dalam photobioreaktor adalah mempermudah pengoperasian reaktor dan menekan fluktuasi lingkungan. Budidaya di luar ruangan cenderung memiliki kondisi lingkungan yang fluktuatif seperti suhu, radiasi dan kontaminasi. Sistem kontrol sering diintegrasikan dengan model PBR untuk kontrol yang lebih baik terhadap kondisi yang diinginkan. Fungsi sistem kontrol bergantung pada jumlah dan jenis variabel yang dikendalikan dan dimanipulasi. Parameter penting untuk mempertahankan nilai optimal meliputi pH, konsentrasi  $\text{CO}_2$ , pemberian substrat untuk mode operasi kontinyu dan semi kontinyu, intensitas dan

frekuensi iluminasi, dan lain-lain. PH merupakan faktor penting untuk dijaga pada tingkat optimal, dan umumnya netral. pH adalah kondisi optimal untuk pertumbuhan berbagai noda mikroalga. Pendekatan pengendali on-off dapat mempertahankan pH dan nilai pH yang optimal dapat dikendalikan baik dengan memompa larutan asam / basa atau dengan memberi makan  $\text{CO}_2$  melalui aliran gas, biasanya konsentrasi lebih dari 0,1%.

Keadaan fisiologis biomassa mikroalga diukur dengan efisiensi fotosintesis. Istilah 'physiostat' dikembangkan oleh Marxen dkk (2005), dimana efisiensi fotosintesis PSII ( $\Phi P$ ) diukur secara garis lurus dengan menggunakan teknik fluoresensi amplitudo modulated (PAM). Radiasi UV ditetapkan oleh loop kontrol umpan balik PI untuk menjaga konstanta  $\Phi P$ . Physiostat berhasil bekerja untuk mengoptimalkan produksi TFA dan EPA oleh *N. salina* (Hoffmann et al., 2010).

Cahaya bertindak sebagai sumber energi penting yang bertanggung jawab untuk fotosintesis mikroalga. Pada kondisi outdoor kontrol intensitas cahaya sangat sulit, sedangkan pada budaya dalam ruangan radiasi dapat diatur untuk mengoptimalkan fotosintesis dan, pada gilirannya, laju pertumbuhan mikroalga. Sistem cahaya modulasi ini untuk mengendalikan fotosintesis dikenal sebagai 'luminostat', dimana cahaya dianggap seperti substrat. Salah satu laporan yang menggunakan luminostat dalam reaktor pengangkutan udara yang dilengkapi dengan delapan lampu fluoresen internal, dan untuk menjaga konstanta iradiasi rata-rata, jumlah lampu meningkat secara bertahap dengan kepadatan biomassa yang lebih tinggi. Model transfer radiasi digunakan untuk menilai medan radiasi. Selanjutnya, parameter kontrol seperti laju serapan cahaya yang spesifik, laju pertumbuhan spesifik dan kepadatan fluks foton yang ditransmisikan melalui PBR dimasukkan ke dalam sistem kontrol. Melnicki dkk. (2013) menggunakan tangki pengaduk PBR dan dua sistem kontrol gabungan, mode turbidostat dan luminostat, dimana tingkat pengenceran dan intensitas cahaya disesuaikan untuk menjaga konsentrasi biomassa dan konstanta transmitansi iradiasi. Yang khas 'turbidostat' adalah jenis mode operasi budaya, baik kontinu maupun semi kontinu, untuk menjaga konstanta konsentrasi biomassa. Dalam kultur kontinyu laju pengenceran disesuaikan sedangkan pada media segar semi kontinu diganti dengan kultur secara berkala. Strategi pengendalian ini dikembangkan untuk meningkatkan produktivitas

## **BIOREFINERY Microalga**

volumetrik dan luas biomassa. Pendekatan yang berbeda dipilih seperti mode SI / SO: satu input dan satu output untuk variabel yang diamati dan dimanipulasi masing-masing. Selanjutnya strategi pengendalian MI / MO dilaporkan oleh Ifrim dkk. (2013), multiple input dan multiple output system yang mengukur dan mengendalikan pH dan konsentrasi biomassa. Dalam sistem kontrol umpan balik non linier multi variabel ini, pH dan konsentrasi biomassa dikendalikan dengan menyesuaikan aliran CO<sub>2</sub> dan tingkat pengenceran. Pada dasarnya sistem kontrol membantu pengendalian kinetika pertumbuhan mikroalga.



## Chapter 4

# PRODUKSI BIOENERGI DARI ALGA

### 4.1 Kebutuhan bioenergi

Pertumbuhan ekonomi global dan pertambahan jumlah populasi penduduk yang pesat menyebabkan terjadinya peningkatan konsumsi energi dunia (Patil *et al.*, 2008). Transportasi merupakan salah satu sektor yang tumbuh dengan cepat dan menggunakan sekitar 27% dari total konsumsi energi (Antoni *et al.*, 2007). Selama ini kebutuhan energi di dunia cenderung dipenuhi dengan bahan bakar fosil berupa batubara, minyak bumi, dan gas alam yang semakin lama semakin menipis dan tidak dapat diperbarui (Assadad, 2010). Meskipun ketersediaan sumber bahan bakar fosil masih tersedia dalam jumlah yang banyak dan dengan harga murah, akan tetapi efek buruk pembakaran bahan bakar fosil berupa peningkatan gas rumah kaca, maka alternatif sumber bahan baku yang terbarukan mulai menjadi hal yang menarik untuk dipelajari dewasa ini. Sampai saat ini, energi sebagai penggerak roda perekonomian manusia masih dipasok dari *fossil fuel*. Energi fosil merupakan energi yang terbatas dan kurang ramah lingkungan. Proses pembakarannya menghasilkan efek yang kurang baik bagi lingkungan dan kesehatan seperti efek *green house*, dikarenakan kandungan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>), dan oksida nitrogen (NO<sub>x</sub>) (Patil *et al.*, 2008).

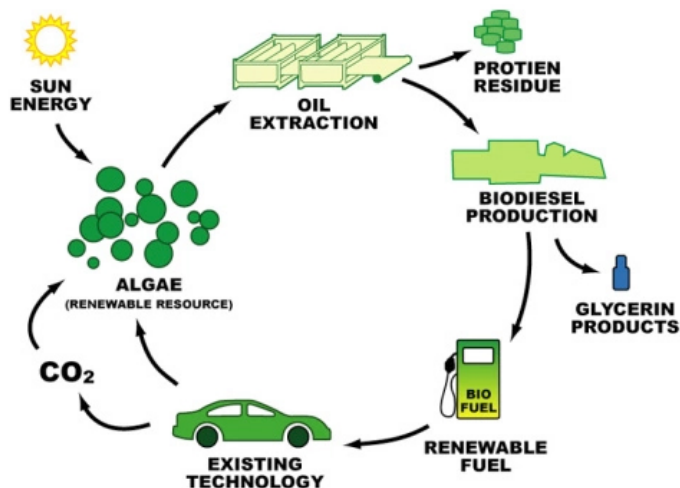
Bahan bakar nabati yang tersedia secara komersial sekarang ini mayoritas terdiri dari bioetanol yang dihasilkan dari molase atau pati jagung dan biodiesel yang dihasilkan dari tumbuhan penghasil minyak termasuk kedelai. Meskipun bahan bakar nabati mempunyai keuntungan yang besar dari sisi lingkungan, tapi penggunaan bahan bakar nabati dinilai masih kurang dapat bersaing secara ekonomi dengan

## BIOREFINERY Microalga

bahan bakar fosil. Di samping itu, penggunaan tumbuhan-tumbuhan tersebut untuk menghasilkan bahan bakar dikhawatirkan akan menimbulkan masalah ketahanan pangan (Pitman, 2011). Oleh karena itu, bahan bakar nabati yang berasal dari mikroalga diharapkan mampu menjadi pendekatan alternatif sumber bahan bakar nabati tanpa perlu mempengaruhi kestabilan pertanian dunia.

### 4.2 Potensi alga untuk produksi bioenergi

Alga, khususnya mikroalga uniseluler berwarna hijau sebenarnya telah lama diketahui sebagai sumber bahan baku yang potensial bagi produksi bahan bakar nabati (Pitman, 2011). Selama ini mikroalga dimanfaatkan sebagai pakan larva ikan pada kegiatan budidaya (Taylor *et al.*, 1997; Brown, 2002). Dengan maraknya penelitian untuk mencari sumber energi alternatif, mikroalga mempunyai prospek yang sangat baik untuk dikembangkan sebagai salah satu kandidat bahan baku penghasil biofuel. Mikroalga dipilih karena memiliki kemampuan tumbuh dengan cepat serta tidak memerlukan area yang luas untuk kegiatan produksi. Di samping itu mikroalga mempunyai kemampuan untuk menyerap karbondioksida sehingga dapat mengurangi efek rumah kaca (Widjaja, 2009). Secara ekonomi, mikroalga dipilih karena ketersediaannya serta biaya produksinya yang cukup rendah (Harun *et al.*, 2010). Skema potensi mikroalga sebagai penghasil bioenergi ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Potensi mikroalga sebagai penghasil bioenergi

Mikroalga merupakan mikroorganisme fotosintetik yang berpotensi digunakan untuk produk *fine chemicals* (Borowitzka, 1999), unsur tambahan makanan untuk manusia dan hewan, sistem imobilisasi pembentukan senyawa ekstraselular, untuk biosorpsi logam berat, Fiksasi CO<sub>2</sub>. Dengan kandungan minyak mencapai 77%, mikroalga juga sangat berpotensi digunakan sebagai biodiesel yang merupakan sumber energi alternatif dan berdasar perhitungan mikroalga mampu menghasilkan minyak 200 kali lebih banyak dibandingkan sumber nabati lainnya. Keuntungan yang didapat dari biodiesel mikroalga yaitu sumbernya yang terbarukan. Selain itu dengan lokasi berada di katulistiwa, Indonesia mempunyai sumber sinar matahari yang sangat cukup sebagai sumber energi untuk fotosintetik mikroalga (Vonshak dan Torzillo, 2004).

Semua jenis alga memiliki komposisi kimia sel yang terdiri dari protein, karbohidrat, lemak (*fatty acids*) dan *nucleic acids* yang persentasenya bervariasi jenis alganya. Ada jenis alga yang memiliki komponen *fatty acids* lebih dari 40%. Dari komponen *fatty acids* inilah yang akan diekstraksi dan diubah menjadi biodiesel (Richmond, 2004).

Seperti bahan baku yang berasal dari tanaman, mikroalga dapat digunakan secara langsung atau diproses menjadi bahan bakar cair dan gas dengan menggunakan proses konversi biokimia dan termokimia. Alga kering dapat menghasilkan energi melalui pembakaran langsung, akan tetapi cara ini dirasa kurang tepat untuk diterapkan pada biomassa alga. Metode yang dapat digunakan untuk melakukan konversi mikroalga menjadi bahan bakar minyak atau gas adalah konversi termokimia yang meliputi gasifikasi, pirolisis, hidrogenasi dan liquefaksi. Metode yang lain adalah metode biokimia termasuk fermentasi dan penguraian anaerobik biomassa untuk menghasilkan bioethanol atau biogas. Di samping itu, gas hidrogen juga dapat dihasilkan dari alga dengan menggunakan fotolisis. Hal yang paling utama adalah pemisahan dan isolasi lemak triasilgliserol dari mikroalga yang dipanen dapat diubah menjadi biodiesel dengan metode transesterifikasi (Pitman, 2011).

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk memanfaatkan mikroalga sebagai bahan baku biofuel. Penelitian yang telah dilakukan cenderung memanfaatkan mikroalga sebagai bahan baku biodiesel (Brown, 2002; Patil *et al.*, 2008; Widjaja,

## BIOREFINERY Microalga

2009). Hal ini dilakukan mengingat kandungan lipid yang ada pada mikroalga cukup tinggi. Namun demikian, mikroalga juga mengandung karbohidrat yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku bioetanol (Assadad, 2010). Chapter ini memaparkan sejauh mana peluang pemanfaatan mikroalga sebagai bahan baku bioethanol dan biodiesel.

### 4.3 Mikroalga penghasil biodiesel

Kandungan minyak mikroalga yang cukup tinggi merupakan salah satu alasan pengembangan biodiesel dari mikroalga oleh negara-negara maju di Eropa, selain alasan yang terkait dengan lingkungan. Komposisi asam lemak pada mikroalga yang sangat bervariasi menyebabkan karakteristik biodiesel yang dihasilkan juga beragam (Amini dan Susilowati, 2010). Kandungan minyak dari beberapa spesies ditunjukkan pada Tabel 4.1. Keragaman spesies mikroalga akan membuat kandungan asam lemak pada mikroalga juga bervariasi. Penelitiannya lebih lanjut menunjukkan bahwa pada umumnya terdapat perbedaan kandungan asam lemak pada mikroalga, seperti yang terlihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.1 Komposisi kandungan minyak pada beberapa spesies mikroalga

Spesies	Kandungan minyak (% berat kering)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	35-55
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	16-40
<i>Chlorella vulgaris</i>	56
<i>Chlorella emersonii</i>	63
<i>Chlorella protothecoides</i>	23-55
<i>Chlorella sorokiniana</i>	22
<i>Chlorella minutissima</i>	57
<i>Dunaliella bioculata</i>	8
<i>Dunaliella salina</i>	14-20
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35-65
<i>Spirulina maxima</i>	4-9
<i>Botryococcus braunii</i>	75

Sumber: Amini, S. dan Susilowati, R. (2010)

Tabel 4.2 Profil kandungan asam lemak pada beberapa spesies mikroalga

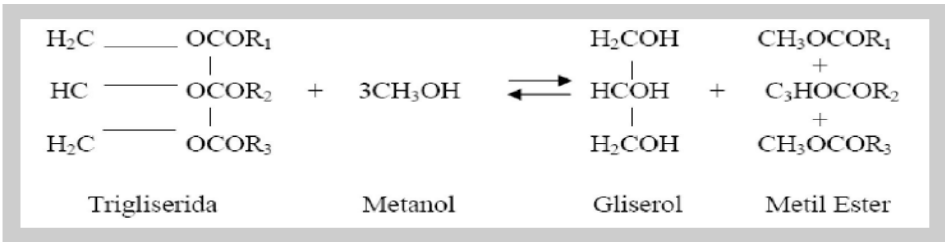
Tabel 3. Profil kandungan asam lemak pada beberapa spesies mikroalga

Jenis asam lemak	Kandungan asam lemak (%)						
	<i>Chlorella sp</i>	<i>Dunaliella sp</i>	<i>Nannocloropsis</i>	<i>Porphyridium</i>	<i>Spirulina sp</i>	<i>Tetraselmis</i>	<i>B.braunii</i>
As. miristat (C14:0)	6,71	8,12	87,35	6,90	11,64	5,37	3,04
As. palmitat (C16:0)	5,95	6,43	20,05	6,04	10,34	6,82	14,11
As. stearat (C18:0)	4,25	8,21	16,68	7,82	8,74	2,17	9,06
As. oleat (C18:1)	24,27	64,20	101,50	26,64	32,76	24,21	14,04
As. linoleat (C18:2)	5,58	32,48	49,02	10,76	21,27	21,07	0,27

Sumber: Amini (2005a).

Sumber: Amini, S. dan Susilowati, R. (2010)

Asam lemak yang bervariasi pada mikroalga salah satunya dapat dimanfaatkan untuk biodiesel. Biodiesel merupakan campuran dari *alkali ether* dan asam lemak yang diperoleh dari proses transesterifikasi minyak nabati atau minyak hewani (Shahzad *et al.*, 2010). Bahan baku diesel adalah hidrokarbon yang mengandung 8–10 atom karbon per molekul sementara hidrokarbon yang terkandung pada minyak nabati rata-rata adalah 16–20 atom karbon per molekul sehingga minyak nabati viskositasnya lebih tinggi (lebih kental) dan daya pembakarannya sebagai bahan bakar masih rendah (Amini dan Susilowati, 2010). Oleh sebab itu agar minyak mikroalga dapat digunakan sebagai bahan bakar (biodiesel) maka perlu dilakukan proses transesterifikasi. Proses transesterifikasi secara kimiawi dapat dilihat pada Gambar 4.2.



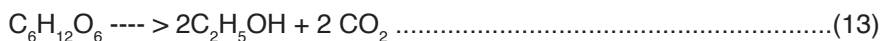
Gambar 4.2 Proses transesterifikasi biodiesel (Zhang *et al.*, 2003)

### 4.4 Mikroalga penghasil bioetanol

Bioetanol adalah etanol atau etil alkohol ( $C_2H_5OH$ ), berbentuk cair, bening tidak berwarna, *biodegradable*, dan tidak menyebabkan korosi. Bioetanol pada umumnya diproduksi melalui proses biokimia (fermentasi) dan proses termokimia (gasifikasi) menggunakan bahan baku hayati (Harun *et al.*, 2010), sedangkan etanol dapat dibuat dengan cara sintesis melalui hidrasi katalitik dari etilen atau bisa juga dengan fermentasi gula menggunakan ragi *Saccharomyces cerevisiae*. Beberapa bakteri seperti *Zymomonas mobilis* juga diketahui memiliki kemampuan melakukan fermentasi untuk memproduksi etanol (Assadad, 2010). Substrat yang umum digunakan untuk fermentasi adalah pati yang berasal dari jagung, gandum, dan gula tebu (molase). Brasil telah memproduksi bioetanol dari tebu, sedangkan Amerika banyak menggunakan jagung. Harga bahan baku yang cukup mahal menyebabkan harga etanol sebagai bahan bakar pengganti minyak bumi masih cukup tinggi, mengingat 60% dari biaya yang digunakan dalam sistem produksi etanol adalah biaya bahan baku (Ingram & Doran, 1995).

Teknik fermentasi dalam produksi bioetanol sampai saat ini masih belum efisien dengan produktivitas yang masih rendah dan membutuhkan modal yang besar. Produksi biomassa yang rendah selama proses fermentasi dan pembentukan produk samping selain etanol menyebabkan efisiensi yang rendah. Untuk meningkatkan produktivitas etanol, perlu dilakukan optimasi kondisi yang dapat dilakukan antara lain dengan cara mutagenesis, pemilihan substrat/bahan baku, dan kondisi fermentasi yang optimum.

Secara teoritis, fermentasi glukosa akan menghasilkan etanol dan karbondioksida. Perbandingan mol antara glukosa dan etanol dapat dilihat pada diagram reaksi berikut:



Satu mol glukosa menghasilkan 2 mol etanol dan 2 mol karbondioksida, atau dengan perbandingan bobot tiap 180 g glukosa akan menghasilkan 90 g etanol. Dengan melihat kondisi tersebut, perlu diupayakan penggunaan substrat yang murah untuk dapat menekan biaya produksi etanol sehingga harga produknya bisa

lebih murah. Secara umum bioethanol digunakan untuk bahan baku industri, bahan minuman, bahan dasar industri farmasi dan kosmetika, serta untuk bahan bakar. Beberapa jenis etanol berdasarkan kandungan alkohol dan penggunaannya yang kita kenal yaitu: (1) etanol untuk industri (90–94,9% v/v), (2) *rectified ethanol* (95–96,5% v/v), (3) jenis etanol yang netral, aman untuk bahan minuman dan farmasi (96–99,5% v/v), serta (3) etanol untuk bahan bakar (99,5–100% v/v) (Assadad, 2010).

Selama ini mikroalga dimanfaatkan sebagai pakan pada budidaya ikan. Untuk kegiatan penelitian maupun produksi biofuel, mikroalga baru dimanfaatkan sebagai bahan baku biodiesel. Mikroalga sebenarnya juga mempunyai peluang untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku bioetanol. Hal ini disebabkan oleh dua hal yaitu 1). Bahan baku bioetanol yang selama ini digunakan, seperti singkong dan pati, merupakan bahan pangan bagi manusia; 2). Adanya kandungan karbohidrat pada mikroalga (Harun *et al.*, 2010).

Kandungan karbohidrat pada mikroalga berbedabeda, tergantung pada spesies dan kondisi lingkungan hidupnya. Spesies mikroalga yang mempunyai potensi untuk digunakan sebagai bahan baku bioetanol yaitu *Prymnesium parvum*, *Chlorococum* sp., *Tetraselmis suecia*, *Anthrospira* sp. (Ragauskas *et al.*, 2006), dan *Chlorella* sp. (Harun *et al.*, 2010; Ragauskas *et al.*, 2006). Kandungan karbohidrat beberapa spesies mikroalga disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Kandungan karbohidrat beberapa spesies mikroalga

Nama Spesies	Kandungan karbohidrat (% berat kering)	Sumber
C. ellipsoidea	15,0-21,0	Guerrero (2010)
C. pyrenoidosa	10,0-67,9	Guererro (2010)
Chlorella sp.	18,4-54,5	Ragauskas <i>et al.</i> (2006); Guerrero (2010)
C. vulgaris	10,3-44,0	Guerrero (2010)
Tetraselmis suecia	11-47	Ragauskas <i>et al.</i> (2006)
Anthrospira sp.	15-50	Ragauskas <i>et al.</i> (2006)
Nannochloris atomus	23,0	Lavens & Sorgeloos (1996)
Isochrysis galbana	12,9	Lavens & Sorgeloos (1996)

Tabel 4.4 Perbandingan produktivitas bioethanol dari beberapa bahan baku

Asal bahan baku	Produktivitas bioethanol (L/ha)
Gandum	2.500
Jagung	3.500
Tebu	6.000
Mikroalga (proyeksi)	20.000

Sumber: Guerrero (2010).

Analisis kelayakan ekonomi produksi biodiesel dan bioetanol dari mikroalga tergantung dari banyak factor dan tidak bisa dibandingkan dengan mudah. Hal ini disebabkan karena:

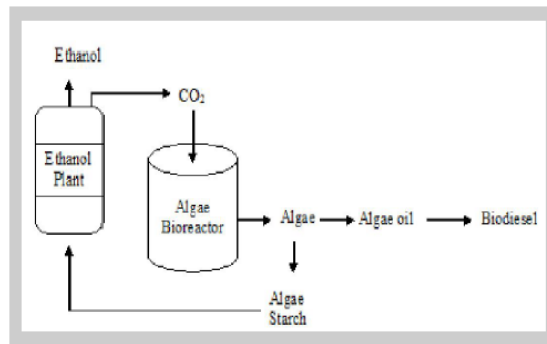
- Teknologi untuk produksi biodiesel sudah banyak diteliti dan dikembangkan, sedangkan proses produksi bioetanol masih dalam tahap penelitian dan belum bisa dikomersialkan.
- Hasil akhir biofuel tergantung pada komposisi kimia biomassa mikroalga serta metode produksi yang digunakan.
- Pemanfaatan mikroalga sebagai biofuel, terutama bioetanol, untuk menjawab isu penggunaan tanaman pangan sebagai bahan bakar serta biomassa yang mengandung lignoselulosa.
- Biodiesel dan bioetanol dari mikroalga bukan merupakan produk yang saling berkompetisi, tetapi merupakan satu kesatuan sistem produksi. Biomassa mikroalga yang sudah diekstrak minyaknya, dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku bioetanol (Assadad, 2010).

Namun demikian, jika melihat pada bahan baku yang digunakan, bioetanol mempunyai prospek yang lebih baik untuk dikembangkan dibandingkan dengan biodiesel. Bahan baku untuk bioetanol dapat berasal dari biomassa mikroalga secara langsung maupun biomassa mikroalga yang sudah diekstrak kandungan lemaknya (Harun *et al.*, 2009).

Integrasi antara bioetanol dan biodiesel dapat dilakukan dengan beberapa cara, misal nya penggunaan spesies yang berbeda untuk masingmasing jenis produk biofuel. Cara lain yang dapat ditempuh yaitu dengan memproduksi bioetanol dengan



bahan baku berupa mikroalga yang sudah diekstrak minyaknya (*bioethanol from de-oiled microalgae*) (Harun *et al.*, 2009; Santhanam, 2010). Hasil penelitian Harun *et al.* (2009) menunjukkan bahwa penggunaan mikroalga yang sudah diekstrak kandungan minyaknya mampu menghasilkan bioetanol pada level produksi sebesar 38%.



Gambar 4.3 Integrasi produksi bioethanol dan biodiesel dari mikroalga  
(Santhanam, 2010)

#### 4.5 Mikroalga penghasil biogas

Biogas merupakan salah satu produk dari teknologi hijau yang sekarang sedang dikembangkan. Hal ini dikarenakan gas yang dihasilkan dari proses biologis (*anaerobic digester*) mampu menghasilkan gas-gas seperti  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  dan gas-gas lain. Dalam hal ini tentu saja yang dimanfaatkan adalah gas metana ( $\text{CH}_4$ ), karena  $\text{CH}_4$  memiliki nilai kalor/panas yang dapat digunakan sebagai bahan bakar. Dekomposisi anaerob menghasilkan biogas yang terdiri dari metana (50 – 70 %), karbondioksida (25 – 45 %) dan sejumlah kecil hidrogen, nitrogen, hydrogen sulfide (Maynell, 1981).

Kemurnian dari biogas tersebut menjadi pertimbangan yang sangat penting, hal ini dikarenakan berpengaruh terhadap nilai kalor/panas yang dihasilkan. Sehingga biogas yang dihasilkan perlu dilakukan pemurnian terhadap impuritas-impuritas yang lain. Dalam hal ini impuritas yang berpengaruh terhadap nilai kalor/panas adalah  $\text{CO}_2$ , keberadaan  $\text{CO}_2$  dalam biogas sangat tidak diinginkan, hal ini dikarenakan semakin tinggi kadar  $\text{CO}_2$  dalam biogas maka akan semakin

## **BIOREFINERY Mikroalga**

menurunkan nilai kalor biogas dan sangat mengganggu dalam proses pembakaran (Yuliandri, et al.. 2013).

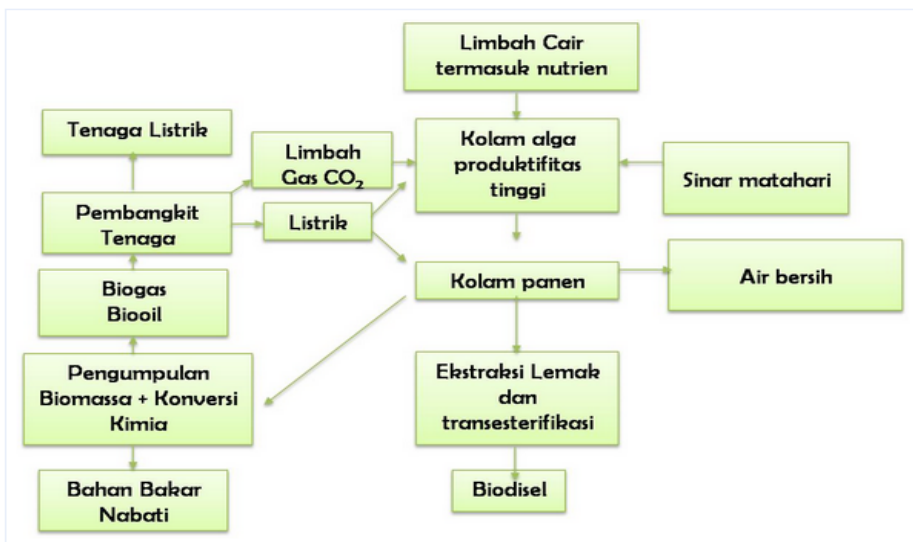
Jika dibandingkan dengan teknologi pemurnian biogas yang sudah dilakukan maka teknologi pemurnian biogas dengan pemanfaatan mikroalga memberikan biaya yang paling murah. Berdasarkan penelitian terdahulu, aplikasi pemurnian biogas dengan mikroalga mampu mengurangi kadar  $\text{CO}_2$  secara efektif. *Spirulina* sp. adalah salah satu jenis mikroalga yang cocok dikembangkan sebagai agen absorber  $\text{CO}_2$ . Alga jenis *spirulina* memiliki pigmen hijau (klorofil) sehingga dapat melakukan proses fotosintesis. Dalam proses fotosintesis tersebut gas  $\text{CO}_2$  diperlukan sebagai bahan baku untuk pembentukan senyawa metabolit dan biomassa. Alga *spirulina* memiliki tingkat pertumbuhan yang relative singkat sehingga kebutuhan gas  $\text{CO}_2$  cukup tinggi. Dengan demikian alga *spirulina* cocok sebagai media untuk membantu penurunan kadar  $\text{CO}_2$  dalam biogas. Karena bersifat heterotroph sebagian besar alga membutuhkan cahaya dan  $\text{CO}_2$ . Strain yang digunakan untuk produksi alga di kolam hendaknya dapat beradaptasi dengan baik pada kondisi tertentu.

Selain itu, produksi biogas dari mikroalga juga perlu diperhatikan seperti substrat harus dipekatkan dan dihindari proses pengeringan. Transportasi biomas basah sebagai raw material juga perlu diperhatikan untuk mengurangi biaya. Untuk itu diperlukan proses integrasi antara reaktor biodigester dan kolam kultivasi mikroalga. Integrasi tersebut akan lebih efisien jika diterapkan dalam limbah cair organik di mana mikroalga tumbuh dalam limbah cair dengan kondisi yang tidak terkontrol (Hadiyanto, 2012).

### **4.6 Potensi produksi bioenergi dari mikroalga secara berkelanjutan**

Salah satu kelebihan dari mikroalga sebagai bahan baku bahan bakar nabati adalah bahwa mikroalga dapat ditumbuhkan secara efektif dengan input air bersih yang sedikit dan tidak memerlukan banyak lahan seperti tanaman penghasil bahan bakar nabati yang lain, sehingga dapat menghemat penggunaan air bersih. Sebagai contoh, mikroalga dapat dibudidayakan dekat dengan laut untuk dapat memanfaatkan garam dan air payau. Oleh karena itu muncul ketertarikan terhadap budidaya mikroalga di perairan asin. Namun, medium potensial lain yang dapat digunakan adalah limbah cair. Masalah utama yang dihadapi dalam pemanfaatan limbah cair

adalah konsentrasi nutrisi yang sangat tinggi, khususnya konsentrasi total N dan total P, serta logam beracun, yang memerlukan pengolahan menggunakan bahan kimia dengan harga yang mahal untuk menghilangkannya selama pengolahan berlangsung. Konsentrasi total P dan N berkisar antara 10-100 mg/l dalam limbah cair perkotaan dan lebih dari 1000 mg/l pada limbah pertanian. Kemampuan mikroalga untuk tumbuh dan mengakumulasi kandungan nutrisi dan logam yang tinggi pada lingkungan secara efektif, menjadikan mikroalga sebagai sarana yang efektif untuk digunakan pada pengolahan limbah cair secara efisien dan berkelanjutan. Namun, telah lama juga diketahui bahwa mikroalga yang ditumbuhkan pada limbah cair dapat digunakan sebagai penghasil energi (Pitman, 2011).



Gambar 1. Diagram alir yang menunjukkan bagaimana sumber limbah cair dapat digunakan untuk produksi bahan bakar nabati berkelanjutan berbasis mikroalga

Gambar 4.4 Diagram alir yang menunjukkan bagaimana sumber limbah cair dapat digunakan untuk produksi bioenergi berkelanjutan berbasis mikroalga.

**Chapter 5****TEKNOLOGI  
PEMANENAN  
PADA  
PRODUKSI  
BIOMASA  
ALGA****5.1 Introduksi**

Kebutuhan dunia akan penggunaan biomasa sebagai produk pangan, pakan, biofuel dan produksi kimia telah meningkat dengan sangat pesat. Untuk melindungi masa depan, upaya untuk menekan kerusakan lingkungan, tetapi juga tidak mengkesampingkan parameter sosial ekonomi yang disertai dengan efisiensi oprasional sangat diperlukan. Bahan bakar fosil yang umumnya digunakan dewasa ini jumlahnya terbatas dan semakin lama semakin berkurang, serta akibat dari penggunaannya menyebabkan terjadinya pemanasan global. Dewasa ini, penelitian terfokus pada pengembangan biofuel yang dapat diperbarui dan potensinya yang bebas dari emisi rumah kaca. Generasi pertama biofuel yang berasal dari tanaman darat memberikan dampak yang besar bagi lingkungan karena penggunaan lahan yang luas mempercepat penggundulan hutan dan juga menimbulkan polusi lingkungan. Ditambah lagi dengan permasalahan tentang penggunaan lahan sebagai budidaya tanaman untuk biofuel atau digunakan sebagai lahan pangan. Pada generasi kedua yang bersumber dari bahan baku lignoselulosa telah mengatasi sebagian besar masalah yang disebabkan oleh generasi pertama, akan tetapi belum dapat mengatasi permasalahan penggunaan lahan. Generasi ketiga biofuel, yakni biofuel yang bersumber dari mikroalga merupakan solusi energi alternatif yang dapat mengatasi masalah yang terdapat pada generasi pertama dan generasi kedua biofuel.

Mikroalga adalah mikroorganisme fotosintesa yang mudah dalam dalam budidayanya (membutuhkan cahaya, gula, CO<sub>2</sub>, N, P, dan K) dan juga dapat

menghasilkan lipid, protein, dan karbohidrat dalam jumlah yang besar dengan jangka waktu yang singkat. Hasil produk ini dapat diproses menjadi biofuel dan juga produk samping yang berharga. Laju produksi biomasa alga untuk jumlah besar dengan penanganan yang minimal dapat dicapai bila teknologinya efisien dan ramah lingkungan. Disinilah peran peneliti dalam meningkatkan produksi biomasa alga dengan menggunakan berbagai macam metode. Terdapat penelitian yang terfokus pada pengembangan produksi biomasa pada fotobioreaktor (Morweiser et al., 2010), dan juga pemilihan mikroorganisme yang cocok untuk produk yang berbeda (Larkum et al., 2012) dan ditambah lagi dengan merekayasa secara genetik metabolisme pada mikroba (Georgianna and Mayfield, 2012). Untuk menekan biaya produksi pada biomasa mikroalga, penelitian pada proses hilir sangatlah esensial (Greenwell et al., 2010).

Sekarang ini, produksi mikro alga telah berlanjut dari tahap skala pilot laboratorium ke skala demo komersial (Georgianna and Mayfield, 2012). Dalam pengefisienan biaya produksi biomasa alga, masalah yang utama adalah pada proses pemanenan mikro alga. Sel mikro alga yang sangat kecil, jika dilakukan pemisahan dengan media kultur airnya akan didapatkan yield yang sangat sedikit. Pada reaktor kolam terbuka konsentrasi mikro alga kurang lebih 0.5 g/L dan pada fotoreaktor 5 g/L, ini berarti perlu dilakukan pemisahan volume air yang banyak untuk proses pemanenannya.

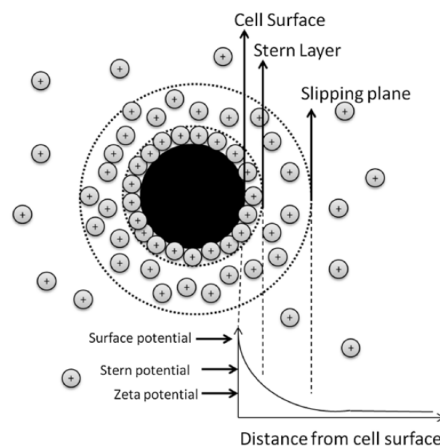
## **5.2 Karakteristik Permukaan Mikroalga**

Alga adalah mikroorganisme eukariotik yang unik, dimana dapat mengkonversi cahaya matahari, air dan CO<sub>2</sub> menjadi sumber biomasa dengan proses fotosintesis. Faktor yang mempengaruhi kestabilan sel alga pada medianya adalah muatan permukaan, ukuran dan densitas. Faktor-faktor tersebut mempengaruhi karakteristik pemisahan pada sel alga dengan media cairnya. Interaksi antar sel serta interaksi dengan medium dapat mempengaruhi kestabilan selnya (Tenney et al., 1969). Laju pengendapan biomasa tergantung pada ukuran dan densitas sel, dimana hal tersebut berperan sangat penting dalam pemisahan secara sedimentasi pada proses sentrifugasi.

Partikel tersuspensi biasanya memiliki muatan permukaan positif atau negatif di dalam air. Partikel tersebut menarik ion yang berlawanan muatan pada

## BIOREFINERY Microalga

larutan sehingga muatannya netral. Ion-ion yang tertarik kemudian melapisi permukaan partikel ini dinamakan *Stern layer*. Lapisan ini dapat ditumpuki oleh ion yang berlawanan dengan partikelnya sehingga membentuk awan muatan. Kesetimbangan partikel ini akan terus berlanjut dari gaya Tarik elektrostatis permukaan partikel menuju difusi termalnya. Hal ini menjadikan formasi dari lapisan difusi berada jauh dari permukaan partikel, sehingga menyebabkan penurunan secara eksponensial perbedaan potensial antara permukaan partikel dengan larutan bulknya. Gaya tolak antar muatan partikel disebabkan oleh awan muatan yang menyelimuti permukaan partikel. Perbedaan potensial antara permukaan partikel dan larutan bulk yang tetap berasosiasi dengan muatan partikel yang tidak lepas pada larutan yang mengalir diistilahkan sebagai ( $\zeta$ ). ( $\zeta$ ) dapat diukur dengan cara mengamati pergerakan partikel pada suatu medan listrik. ( $\zeta$ ) potensial yang tinggi ( $>25$  mV, positif dan negatif) menyebabkan gaya tolak elektrik yang kuat antar partikel dan tersuspensi secara stabil. Pada saat ( $\zeta$ ) mendekati nol, partikel-partikel saling berhubungan satu sama lain hanya dipengaruhi oleh gaya Van der Waal yang menyebabkan terjadinya pengumpulan partikel. Pada permukaan sel pada umumnya terdapat gugus karboksilik ( $-\text{COOH}$ ) dan gugus amin ( $-\text{NH}_2$ ) yang mana mempengaruhi muatan permukaannya. gugus karboksilik bermuatan negatif pada pH di atas 4-5, sedangkan gugus amin tidak terpengaruh pada pH range tersebut. Hal ini menjadikan muatan pada permukaan saat pH di atas 4-5 bermuatan negatif (Gambar. 5.1)



Gambar. 5.1 sel mikroalga bermuatan negatif diselimuti oleh dua lapisan ion elektrik (diubah dari Vandamme et al., Trends in Biotechnology, 2013)

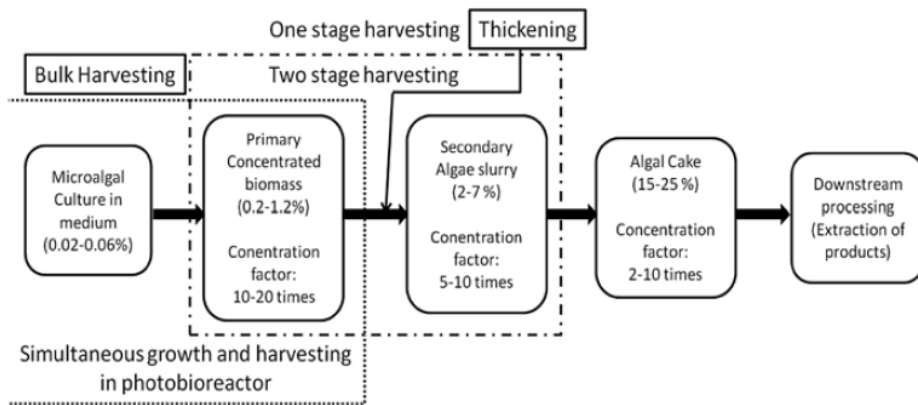
### **5.3 Metode Pemanenan Alga**

Pemrosesan lebih lanjut pada biomasa alga untuk menjadi produk mensyaratkan untuk kultur alga yang bebas dari air. Hal ini merupakan langkah yang penting dalam life cycle assessment (LCA) dalam proses pemanenan, mengingat pemanenan biomasa memakan biaya yang besar dalam produksinya (20%-30%) (Rawat et al., 2011). Metode pemanenan yang efisien diperlukan dalam ekstraksi skala besar pada produksi mikroalga (Amaro et al., 2011; Uduman et al., 2010b). Pemilihan metode pemanenan sangat berdampak pada biaya produksi biofuel. Factor pemilihan yang menentukan metode pemanenan layak dipilih tergantung pada karakteristik mikroalga, sebagai contoh, densitas dan ukuran sel alga dan juga produk yg dihasilkan dari biomasa alga (Amaro et al., 2011). Idealnya metode pemanenan tidak bergantung pada spesies alga, efisien secara energy, ramah lingkungan dan mungkin juga menghasilkan produk yang diinginkan dari biomasa alga (Chen et al., 2011). Untuk menampilkan bahwa prosesnya dapat diperbaharui, mikroalga dihilangkan kandungan airnya dan dijadikan konsentrat dari kultur airnya. Hal tersebut merupakan tantangan utama yang harus dilalui (Uduman et al., 2010a). Kedua, sel alga sangat stabil pada medium yang bermuatan negatif dan material organik algogenik berlebih yang dihasilkan pada saat metabolismenya (Amaro et al., 2011). Banyak strategi pemanenan seperti, sentrifugasi, sedimentasi, flokulasi, flotasi, dan mikro-filtrasi digunakan untuk pemanenan mikroalga (Amaro et al., 2011), elektroforesis (Amaro et al., 2011; Uduman et al., 2010a) dan kombinasinya (Rawat et al., 2011).

Pemanenan mikroalga secara umum dapat dibedakan menjadi dua tahap proses (Gambar. 5.2), meliputi:

- Pemanenan Bulk: tujuan dari proses ini adalah untuk memisahkan biomasa mikroalga dari suspensi bulknya. Dengan metode ini, total padatan dapat mencapai 2-7 % w/v dengan menggunakan proses flokulasi, flotasi, atau sedimentasi gravitasi (Brennan and Owende, 2010).
- Thickening: tujuan dari proses pemanenan ini adalah untuk mempekatkan slurry dengan filtrasi dan sentrifugasi. Pada tahap ini memerlukan energy yang lebih banyak bila dibandingkan dengan pemanenan bulk (Brennan and Owende, 2010).

## BIOREFINERY Microalga



Gambar. 5.2 Skema langkah Pemanenan biomasa mikroalga.

### 5.3.1 Penyaringan

Dua alat utama yang digunakan untuk pemanenan mikroalga adalah *microstrainer* dan *vibrating screen filter*, kedua alat ini dipilih karena simpel dan tersedia dalam ukuran yang besar. *Microstrainer* adalah rotary filter dengan ukuran filter yang sangat kecil. Alat ini memiliki kelebihan yakni mudah digunakan, mudah dibuat, biaya perakitan yang murah, dan dikarenakan pergerakan yang cepat absorpsinya dapat diabaikan, efisien dan mempunyai rasio ion yang tinggi. Konsentrasi mikroalga merupakan bagian yang paling menentukan dalam efisiensi dari alat filtrasi. Konsentrasi mikroalga yang tinggi dapat menyebabkan penyumbatan (*clogging*) pada lubang filter, sedangkan rendahnya konsentrasi mikroalga menyebabkan pemisahan yang tidak efisien (Wilde et al., 1991). Penelitian *microstraining* oleh Molina Grima et al. (2003) juga menyatakan hal tersebut dan menyimpulkan bahwa perlu adanya proses flokulasi sel sebelum dilakukan proses *microstraining*. Metode pemanenan mikroalga yang sangat efisien sebagai contoh, filtrasi aliran tangensial dapat menghasilkan 70-89% biomasa mikroalga (Petrusevski et al., 1995). Ditambah lagi, filtrasi aliran tangensial menjaga struktur, sifat, dan pergerakan dari mikroalga. Walaupun penelitian pada skala laboratorium telah berhasil pada bagian hilir (Rossignol et al., 1999 ; Rossi et al., 2004), penelitian tentang pemanenan mikroalga pada skala besar belum dilakukan. Penelitian yang dilakukan oleh Lazarova et al.



(2006) menunjukkan bahwa biaya proses mikro filtrasi air sungai dapat dilakukan dengan hanya menggunakan  $0.2 \text{ kW h}^{-1}\text{m}^{-3}$ . Dengan mengurangi volume proses setidaknya 100 kali dapat mengurangi biaya yang disebabkan gangguan di proses hilir secara signifikan. Beberapa pilihan membrane dan jenis dari mikroorganisme dapat pula meningkatkan beban biaya, tetapi pada proses ini masih dapat dilakukan pengoptimalan proses. Sebagai pedoman dalam potensi pengembangannya, yakni biaya desalinasi untuk reverse osmosis, yang mana dulunya menggunakan tekanan yang sangat tinggi, telah turun secara drastis (85%) dalam kurun waktu satu dekade dengan biaya produksi kurang lebih  $\$ 1 \text{ m}^{-3}$  dan energy yang dibutuhkan untuk proses desalinasi menurun hingga  $3 \text{ kW h}^{-1}\text{m}^{-3}$ . Penurunan tersebut dipengaruhi oleh teknologi membran yang semakin maju; kekuatan membran yang makin tahan lama; peningkatan skala operasi dan manajemen system yang semakin baik, kemajuan yang semacam ini mungkin juga akan terjadi pada proses separasi pemanenan mikroalga (Greenwell et al., 2010).

#### 5.3.1.1 Microstraining

Dengan menggunakan rotary drum filter (microstrainer) yang di lapisi dengan kain penyaring, dari bahan stainless steel ataupun polyester, didapatkan hasil penyaringan dengan konsentrasi mikroalga yang sangat rendah, sehingga masih diperlukan proses pemisahan dengan air yang lebih lanjut. Proses backwashing pada tahap selanjutnya diperlukan dalam rangka meningkatkan hasil panen biomasa mikroalga untuk *high rate clarification pond*. Slurry hasil pemisahan dari microstrainer kemudian pekatkan dengan proses selanjutnya. (Koopman et al., 1978; Shelef et al., 1980). Terdapat penelitian yang sukses pada penelitian dengan spesies *Microactinium* dan *Scenedemus*, hasil ukuran terkecil adalah  $23 \mu\text{m}$ . Hasil penelitian yang lebih sukses berhasil mereduksi fase solid tersuspensi pada efluen kolam dari 80 menjadi  $20 \text{ mg l}^{-1}$  bahkan kurang dengan menggunakan rotary microstrainer yang dipasang penyaring dengan ukuran  $1 \mu\text{m}$  (Wettman and Cravens, 1980). Pemekatan dari *Coelastrum proboscideum* menjadi 1.5 % padatan tersuspensi oleh microstrainer diperlukan biaya operasi sebesar DM  $0.02 \text{ m}^{-3}$  dan konsumsi energinya  $0.2 \text{ kW h}^{-1} \text{ m}^{-3}$  (Mohn, 1980). Masalah yang ditemui pada microstrainer diantaranya adalah efisiensi pemanenan yang rendah dan sulitnya

## BIOREFINERY Microalga

menangani flokulasi partikel. masalah tersebut dapat ditangani dengan memvariasi kecepatan putaran drum (Reynolds et al., 1975). Masalah lain yang berhubungan dengan proses microstraining adalah terbentuknya jaringan biofilm bakteri dengan alga yang berbentuk slime (lender) pada kain filter. Pembersihan kain filter secara berkala dapat membantu mengurangi pertumbuhan biomasa tersebut.

### 5.3.1.2 Vibrating Screen

Penelitian yang dilakukan oleh Mohn (1980) menerangkan bahwa pemanenan Alga *Coelastrum* dapat dipanen dengan metode vibrating screen. Konsentrasi padatan alga yang dipanen pada operasi batch (7-8%) lebih tinggi dibandingkan pada proses kontiyu (5-6%). Pada skala komersial produksi, *vibrating screen* digunakan untuk memanen *Spirulina* sebagai sumber pangan dimana *Spirulina* ini merupakan mikroalga yang berserabut dan berwarna hijau-biru serta termasuk dari keluarga *Spirulina* dan *Arthrospira* (Habib et al., 2008). Dalam penggunaannya filtrasi dengan menggunakan vibrating screen dapat menghasilkan panen mikroalga dengan efisiensi pengurangan volumenya mencapai 95% dan laju pemanenannya  $20 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$  dengan hasil slurry mencapai 8-10% komponen padatan. Dibandingkan dengan menggunakan metode inklinasi filtrasi dengan alat yang sejenis dimana luas filternya 2-4  $\text{m}^2$  per unit, vibrating screen hanya membutuhkan sepertiga dari luas area tersebut.

### 5.3.2 Coagulasi-Flokulasi

Coagulasi-flokulasi adalah proses dimana sel alga berkumpul menjadi kumpulan yang lebih besar. Kumpulan yang besar ini akan mudah difilter, cepat memisah dan mudah di panen. Bahan kimia yang digunakan sebagai koagulan alga dapat dibedakan menjadi dua kategori, yaitu koagulan inorganik dan koagulan organik rantai panjang. Terjadinya Flokulasi alga dapat dicapai dengan berbagai macam cara, mulai dari proses flokulasi tradisional yang banyak dilakukan di bidang industri (flokulasi kimia) sampai dengan gagasan yang paling terbaru yang berasal dari biologi mikroalga (biolokulasi) dan juga penggunaan teknologi terbaru (nanopartikel magnetik).

### 5.3.2.1 Flokulasi Kimia

Pengolahan air dan industry pertambangan secara luas menggunakan flokulan kimia seperti besi klorida dan alum. Walaupun garam digunakan sebagai bahan pemanenan mikroalga (contoh: *Dunaliella*; Ben-Amotz and Avron, 1990), penggunaannya yang dalam konsentrasi tinggi menyebabkan metal yang berada di garam tertinggal di residu biomasa setelah dilakukan ekstraksi lipid atau karotenoid (Rwehumbiza et al., 2012). Lebih jauh lagi dalam penggunaan biomasa sebagai sumber protein untuk makanan binatang dapat menyebabkan gangguan metabolisme binatang dikarenakan akumulasi metal yang terdapat pada biomasa. Peningkatan fraksi protein untuk makanan binatang

Sangatlah penting untuk menjadikan biofuel mikroalga dapat diperhitungkan secara ekonomi (Wijffels et al., 2010). Meskipun dengan kekurangan tersebut, koagulan metal menyajikan system model yang bagus untuk mempelajari interaksi antara flokulan dan sel mikroalga dikarenakan sifat-sifatnya yang sudah sangat dipahami (Wyatt et al., 2012 ; Zhang et al., 2012). Flokulan kimia lain yang juga umum digunakan dalam berbagai industry adalah polimer sintetik poliakrilamida. Akan tetapi flokulan ini mungkin meninggalkan racun akrilamida dan mengkontaminasi biomasa mikroalga (Bratby, 2008). Alternatif yang terbilang aman antara lain adalah flokulan yang berasal dari biopolimer alam. Dikarenakan permukaan sel mikroalga yang bermuatan negative flokulan yang digunakan harus bermuatan positif, yang mana jenis tersebut sangat jarang ditemui di alam. Biopolimer dengan muatan positif yang terkenal adalah chitosan. Chitosan berasal dari produk limbah cangkang seafood yaitu chitin. Chitosan merupakan flokulan yang sangat baik, akan tetapi flokulan ini bekerja pada pH rendah, sedangkan pada mikroalga berada pada rentang pH yang relatif tinggi (Chang and Lee, 2012). Alternatif dari Chitosan ini adalah modifikasi pati yang bermuatan positif (cationic starch), yang mana dibuat dari pati yang ditambahkan seperempat bagian dengan gugus ammonium. Muatan dari seperempat bagian gugus ammonium ini tidak tergantung pH, oleh sebab itu modifikasi pati ini bekerja pada rentang pH yang lebih luas jika dibandingkan dengan Chitosan (Vandamme et al., 2010). Contoh yang lain dari biopolymer yang bisa digunakan sebagai flokulan mikroalga adalah *poly-γ glutamic acid* yang mana diproduksi oleh *Bacillus subtilis* (Zheng et al., 2012) atau polimer yang terdapat pada tepung dari biji *Moringa*

## BIOREFINERY Microalga

*oleifera* (Teixeira et al., 2012). Akan tetapi terjadinya pelingkar polimer flokulan pada muatan ionik tinggi merupakan masalah yang menyebabkan proses ini tidak efektif (Uduman et al., 2010a). Oleh karena hal tersebut, metode ini tidak begitu cocok untuk diterapkan pada proses pemanenan mikroalga di air laut.

### 5.3.2.2 Autoflokulasi

Peningkatan pH di atas 9 akan menyebabkan terjadinya flokulasi spontan pada mikroalga (Spilling et al., 2011). Penyerapan CO<sub>2</sub> oleh mikroalga menyebabkan menurunnya pH pada medium saat berlangsungnya fotosintesis. Hal tersebut menyebabkan terjadinya perkumpulan pada sel secara spontan yang menyebabkan terjadinya flokulasi. Autoflokulasi adalah suatu proses terjadinya pengendapan kalsium atau magnesium. Tergantung pada kondisinya, pengendapan ini membawa muatan positif dan dapat menyebabkan flokulasi dengan penetralan muatan dan/atau dengan *sweeping flocculation*. Saat ion kalsium excess pada medium, ion tersebut akan berinteraksi dengan permukaan sel yang bermuatan negatif dan menyebabkan pengumpulan ion positif dari kalsium fosfat (Christenson and Sims, 2011 ; Schlesinger et al., 2012). Proses flokulasi jenis ini memerlukan konsentrasi fosfat yang tinggi pada medium, sehingga untuk membuat proses ini sustainable, mikroalga disarankan untuk dikembangkan pada air limbah dengan konsentrasi fosfat yang tinggi, sehingga dapat dipanen dengan metode tersebut diatas (Lundquist et al., 2010). Magnesium hidroksida atau brisit juga mengendap pada pH tinggi. Pengendapan ini bermuatan positif sampai pada pH 12 dan juga dapat berinteraksi dengan permukaan sel mikroalga untuk selanjutnya terjadi proses flokulasi (Vandamme et al., 2012 ; Wu et al., 2012). Umumnya air yang digunakan dalam kehidupan sehari-hari telah mengandung magnesium yang cukup untuk proses ini. Kalsium karbonat atau calcite juga mengendap pada pH tinggi, tetapi dalam penggunaannya untuk memicu flokulasi mikroalga belum pernah dilakukan. Flokulasi pada pH tinggi pada dasarnya disebabkan karena terjadinya pengendapan kandungan inorganik yang berkumpul, bukan disebabkan oleh pH pada media. Oleh sebab tersebut, pemanenan biomasa ini mengandung konsentrasi mineral yang tinggi (Show et al., 2013). Walaupun hasil panen dari proses tersebut rendah dalam toksisitasnya, akan lebih baik jika kandungan mineral tersebut dapat dihilangkan dari biomasa yang dipanen.

### **5.3.2.3 Metode flokulasi fisik**

Kelemahan dari berbagai metode yang disebutkan diatas menghasilkan biomasa alga dengan kandungan kontaminan dari berbagai macam senyawa kimia yang tinggi. Kelemahan tersebut dapat diminimalisir jika menggunakan metode flokulasi fisik dalam memanen biomasa. Sebagai contoh, flokulasi mikroalga dapat dilakukan dengan menggunakan bantuan gelombang ultrasonik. Walaupun begitu, pengaplikasiannya untuk skala besar sedang dalam pengujian (Bosma et al., 2003). Pada elektro koagulasi-flokulasi, flokulasi dipicu dengan larutan elektrolit dengan menggunakan anoda metal (Vandamme et al., 2011). Efisiensi dari metode ini dapat meningkan dengan mengubah polaritas elektroda (Kim et al., 2012). Metode ini hamper sama dengan metode flokulasi menggunakan garam metal, aka tetapi kontaminan yang dihasilkan lebih sedikit jika menggunakan metode elektroflokulasi ini. OriginOil mengklaim telah menemukan pemecahan masalah ini. Metodenya ialah dengan menggunakan gelombang elektromagnetik untuk menetralkan muatan permukaan dari sel mikroalga sehingga terjadilah proses flokulasi (Gouveia, 2011). Beberapa waktu yang lalu, penelitian mengenai penggunaan nanopartikel magnetic untuk pemanenan mikroalga telah dilakukan. Magnetite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) nanopartikel ditambahkan ke dalam media untuk kemudian diserap oleh sel mikroalga, selanjutnya mikroalga di panen dengan cara memaparkannya pada medan magnet. Metode ini kemudian menggabungkan flokulasi dan separasi dalam satu tahap proses (Cerff et al., 2012). Nanopartikel Magnetite ini lebih mudah untuk terserap ke sebagian spesies mikroalga jika dibandingkan dengan yang lain (Xu et al., 2011). Adsorpsi ini juga dapat ditingkatkan dengan melapisi nanopartikel dengan polimer kation (Lim et al., 2012 ; Liu et al., 2009). Kelebihan dari metode ini adalah nanopartikel yang digunakan dalam proses pemanenan mikroalga dapat dipisahkan dan digunakan ulang dalam proses pemanenan selanjutnya (Cerff et al., 2012).

### **5.3.2.4 Bioflokulasi**

Flokulasi secara spontan oleh mikroalga merupakan fenomena umum yang dapat diamati pada perkembangan mikroalga yang terdapat pada kolam, sungai ataupun danau. Fenomena flokulasi spontan pada mikroalga ini di asumsikan terjadi akibat polimerisasi senyawa ekstraseluler yang terdapat pada medium yang mana

## **BIOREFINERY Microalga**

dinamakan bioflokulasi. Bioflokulasi seringkali berhasil dilakukan dalam pemanenan mikroalga yang mana digunakan dalam treatment air limbah (Craggset al., 2012). Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan untuk mengetahui mekanisme terjadinya bioflokulasi. Hal tersebut mungkin mengarah pada proses yang sustainable dan efisien pada segi biaya dalam pemanenan biomasa alga. Beberapa spesies mikroalga lebih cepat memflokulasi dibandingkan spesies lainnya, yang mana spesies yang secara natural terflokulasi ini dapat dicampur dengan spesies lain untuk memicu terjadinya flokulasi (Schenk et al., 2008 ; Taylor et al., 2012). Terdapat indikasi bahwa bioflokulasi mungkin dipicu dengan kandungan kimia yang terdapat pada mikroalga (Eldridge et al., 2012). Telah dilakukan penelitian tentang pengisolasian kandungan kimia dan kultur flokulasi dari spesies *Skeletonema* dan didapati dapat memicu flokulasi kultur pada spesies mikroalga lain (Salim et al., 2012). Bakteri dan fungi juga dapat memicu terjadinya bioflokulasi pada mikroalga. Salah satu contoh fungi yaitu, hyphae yang memiliki muatan positif berinteraksi dengan sel mikroalga yang bermuatan negatif dan menyebabkan flokulasi (Zhou et al., 2012 ; Zhang and Hu, 2012). Bakteri konsorsium spesifik juga dapat dipakai untuk memicu proses flokulasi mikroalga (Gutzeit et al., 2005 ; Lee et al., 2008). Co-flokulasi menggunakan bantuan bakteri ataupun fungi memerlukan sumber karbon organik dalam medium. Sumber karbaon tersebut dapat dipenuhi dengan kandungan karbon yang terdapat pada air limbah sebagai media untuk mikroalga. Dengan metode ini dihasilkan kultur campuran flokulasi alga-bakteri yang dapat dipanen dengan lebih mudah (Van Den Hende et al., 2011 ; Su et al., 2011). Dengan menggunakan bakteri atau fungi sebagai agen flokulasi dapat menghindari kontaminasi kimia pada biomasa, akan tetapi metode ini menghasilkan kontaminasi mikrobiologi pada biomasa. Dilain sisi, biomasa digunakan sebagai bahan baku untuk biofuel, dengan menggunakan spesies fungi yang memiliki kandungan intraseluler tinggi dapat digunakan bersamaan dengan mikroalga yang untuk selanjutnya tidak perlu untuk dilakukan proses separasi.

### **5.3.3 Filtrasi**

Filtrasi merupakan metode yang mana kultur alga dilewatkan filter sehingga alga akan tertinggal di filter penyaring dan terpisah dengan air. Proses ini dilakukan

secara terus-menerus dan menghasilkan pasta alga yang kental. Mikro filtrasi, dead end filtrasi, filtrasi vakum, filtrasi dengan tekanan, ultra filtrasi, dan tangensial flow filtrasi (TFF) adalah beberapa jenis teknik filtrasi (Harun et al., 2010). Aplikasi filtrasi secara umum terbatas pada skala laboratorium. untuk skala yang lebih besar, pengaplikasiannya sendiri terkendala masalah penyumbatan membrane, terbentuknya formasi pada *filter cake* dan biaya perawatan yang tinggi. Separasi mikroalga menggunakan filtrasi sangat memakan biaya dan hanya terbatas pada filamentous atau mikroalga dengan ukuran besar. Umumnya teknik filtrasi yang digunakan untuk separasi mikroalga adalah tangensial flow filtrasi. Kelebihan dari TFF adalah menjaga bentuk struktur, sifat, motilitas dari mikroalga. Akan tetapi, biaya yang dibutuhkan untuk pemompaan dan penggantian membrane filtrasi membatasi pengaplikasiannya jika digunakan untuk skala besar. Aplikasi filtrasi tekanan atau filtrasi vakum digunakan untuk menyaring mikroalga besar, tetapi biomasa dengan konsentrasi tinggi juga memerlukan tahap filtrasi ini. Konsumsi tenaga yang besar dibutuhkan dalam proses operasi ini (berkisar pada rentang  $0.3 - 2 \text{ kW h}^{-1} \text{ m}^{-3}$ ) dimana hampir menyamai kebutuhan tenaga pada proses sentrifugasi (Molina Grima et al., 2003). Alga dengan ukuran yang lebih besar dapat disaring secara efektif dengan filtrasi vakum dengan kombinasi dari *filter aid*, sedangkan penggunaan mikro filtrasi atau ultra filtrasi efektif untuk menyaring alga yang lebih kecil. metode lain pada proses filtrasi yaitu tangensial flow filtrasi, 70% - 89% alga dapat tersaring dengan menggunakan metode ini (Rawat et al., 2011). Jika ditinjau dari hasil filtrasi dan konsentrasi umpan masuknya, berdasarkan penelitian terbaru, TFF dan filtrasi bertekanan adalah metode filtrasi yang efisien energi dalam pemanenan mikroalga. Masalah seperti pencampuran ulang pada metode filtrasi sederhana, sebagai contoh dead end filtrasi, tidak cocok untuk pemisahan air pada kultur mikroalga. Akan tetapi, jika dilakukan proses sentrifugasi setelahnya, memberikan hasil separasi yang lebih baik. Metode filtrasi, disamping memiliki daya Tarik pada pilihan separasi terhadap air, tetapi juga memiliki tambahan biaya operasi dan kebutuhan lain untuk proses pre-konsentrasi (Harun et al., 2010).

#### 5.3.4 Sedimentasi Gravitasi

Aplikasi sedimentasi secara umum termasuk dalam pemisahan mikroalga

## BIOREFINERY Microalga

dalam air dan pemrosesan air limbah. Desnitas dan radius sel alga dan peningkatan kecepatan sedimentasi mempengaruhi karakteristik endapan padat tersuspensi (Brennan and Owende, 2010). Sedimentasi merupakan proses yang simpel akan tetapi kecepatan pengendapannya sangat lama ( $0.1 - 2.6 \text{ m h}^{-1}$ ) (Choi et al., 2006). Lingkungan dengan temperature tinggi memungkinkan untuk terjadinya degradasi pada biomasa alga. Penmanenan mikroalga secara terpadu dengan sedimentasi bisa dilakukan dengan menggunakan *lamella separator* dan tangki sediementasi (Uduman et al., 2010a). kemungkinan sukses dalam sedimentasi gravitasi tergantung pada densitas dari partikel mikroalga. Penelitian yang dilakukan Edzwald (1993) menunjukkan bahwa separasi dengan sedimentasi gravitasi pada mikroalga dengan densitas kecil tidak berhasil. Ditambahnya proses flokulasi untuk meningkatkan efisiensi dari sedimentasi gravitasi.

### 5.3.4.1 Penjernihan dalam Kolam atau Tangki Sedimentasi Sederhana

Laporan mengenai sedimentasi alga pada kolam selalu diiringi dengan metode flokulasi. Oprasi ini melibatkan siklus *fill-and-draw* pada kolam kedua yang memberikan kenaikan secara signifikan dalam pemisahan alga dari efluen kolam oksidasi fakultif (Benemann et al., 1980). Penggunaan kolam kedua yang mirip diterapkan pada pengendapan alga dari efluen kolam dengan kecepatan oksidasi tinggi (Adan and Lee, 1980; Benemann et al., 1980). Penjernihan efluen yang baik serta sluri alga dengan 3% kandungan solid di capai dengan autoflokulasi alga yang dipadukan dengan proses pengendapan. Takaran koagulan pada tabung pengendap untuk memicu sedimentasi alga telah diteliti oleh Mohn (1980). Pada pengoprasian secara batch diperoleh konsentrasi alga dengan 1.5% kandungan solid. Separasi alga pada kolam pengendapan merupakan proses yang simpel dan tidak memerlukan biaya yang mahal. Akan tetapi, kecepatan pengendapannya dipengaruhi oleh penggunaan flokulan. Oleh karena itu, pendalaman studi tentang mekanisme flokulasi pada mikroalga diperlukan guna diterapkannya dalam proses pemanenan mikroalga pada kolam atau tangka sedimentasi. Flokulan yang berbeda dapat dicoba sebagai pemilihan flokulan yang terbaik dalam proses ini.



#### 5.3.4.2 Lamella Type Tangki Sedimentasi.

Modifikasi dari tangki sedimentasi sederhana diterapkan, yang mana plat-plat dipasang miring di dalam tangki. Kemiringan dari plat didesain sedemikian rupa sehingga partikel alga yang mengendap terkumpul dalam endapan yang mana dapat dipanen menggunakan pompa (Mohn, 1980 ; Shelef et al., 1984). Konsentrasi alga hasil panen yang didapat 1.6% kandungan solid, dan penambahan koagulan di sarankan jika suspnesinya adalah alga kecil seperti *Scenedesmus* yang diumpankan ke system (Mohn, 1980). Operasional metode ini cukup bisa di andalkan serta diperlukan juga pemekatan sluri alga lebih lanjut.

#### 5.3.4.3 Flokulasi-Sedimentasi

Penelitian mengenai flokulasi yang disertai dengan sedimentasi gravitasi pada separasi alga sudah dilakukan (Golueke and Oswald 1965). Mentritmen dengan kolam efluen oksidasi tinggi, hasil prosesnya dapat mencapai 85% biomasa alga dengan menggunakan alum sebagai koagulannya. Hasil ini dinilai sebagai proses yang efektif dimana sluri alga yang didapat adalah 1.5% w/v kandungan solid. Pembandingan antara metode flokulasi-sedimentasi dengan flokulasi-flotasi didapati bahwa operasi flokulasi-sedimentasi lebih optimal untuk separasi alga (Friedman et al., 1977; Moraine et al., 1980).

#### 5.3.5 Floatasi

Beberapa alga mungkin tidak memiliki kecepatan pengendapan yang mana tidak cocok untuk dipisahkan secara separasi dengan gravitasi. Secara bergiliran alga jenis ini mengambang di permukaan dan susah untuk mengendap. Masalah yang seperti tersebut dapat diselesaikan dengan pemanenan teknik flotasi. Penjelasan simpel dari flotasi ini adalah merupakan kebalikan dari pemekatan secara gravitasi. pemekatan bukan terjadi di dasar tangki, melainkan separasi cair-padat dilakukan dengan mengalirkan gelembung udara pada dasar tangki flotasi. Gabungan antara kemampuan mengapung dari partikulat dan adanya gaya keatas dari gelembung udara yang naik keatas membantu dalam proses separasi. Pada suatu ketika, partikel yang mengambang di permukaan membentuk suatu lapisan sluri tebal dan dapat dipanen dengan operasi *skimming* (Chen et al., 1998). Takaran

## BIOREFINERY Microalga

koagulan yang optimal diperlukan untuk pemanenan biomasa alga dengan metode flotasi secara efisien (Bare et al., 1975). Beberapa koagulan yang berbeda telah digunakan dalam system flotasi ini. Bahan kimia seperti garam alumunium dan garam feri, serta beberapa jenis polimer telah digunakan untuk membantu terjadinya flotasi dengan cara menambah kapasitas padatan dari persentase pengembangan padatan, dan kejernihan dari efluen. Factor waktu yang mana menjadi masalah pada proses sedimentasi telah diatasi dengan bantuan dari teknik flotasi. System flotasi juga menawarkan konsentrasi padatan yang lebih tinggi dan biaya peralatan yang lebih rendah. Terdapat tiga variasi dasar dalam system pemekatan dengan flotasi: flotasi dengan kelarutan udara, elektro flotasi (*electrolytic flotation*), dan flotasi dengan dispersi udara.

### 5.3.5.1 Flotasi dengan Kelarutan Udara

Pada system flotasi yang sering disebut *dissolved-air flotation* (DAF) ini, aliran cairan dijenuhkan dengan udara yang diberi tekanan pada unit DAF yang kemudian bercampur dengan umpan masuk. Tekanan yang kemudian menurun kembali ke kondisi atmosfer semula menyebabkan udara terlarut keluar dari larutan sebagai gelembung dan akhirnya membawa partikulat kecil menuju ke permukaan, yang mana kemudian terkumpul dan dapat diambil dengan *skimmer*. Pengaplikasian proses DAF untuk separasi alga dengan bantuan flokulasi kimia telah dilakukan (McGarry and Durrani, 1970; Bare et al., 1975; Sandbank, 1979). Parameter yang mempengaruhi kualitas dari kejernihan efluen adalah laju recycle, tekanan pada tangki udara, waktu retensi hidrolik dan laju pengembangan partikel (Bare et al., 1975; Sandbank, 1979). Konsentrasi sluri bergantung pada kecepatan skimmer dan kemampuannya untuk menumpuk melebihi permukaan air (Moraine et al., 1980). DAF telah digunakan untuk membersihkan efluen dari kolam alga dengan efisiensi pengentalan yang tinggi (6%). DAF jika dikombinasikan dengan flotasi dapat meningkatkan konsentrasi pemanenan alga (Bare et al., 1975; Friedman et al., 1977; Moraine et al., 1980). Pengoptimasian parameter untuk DAF akan menghasilkan separasi yang lebih efisien untuk biomasa yang akan dipisahkan.

### 5.3.5.2 Elektro-Flotasi

Pada saat proses elektrolisis air terpisah menjadi hydrogen. Hydrogen yang berupa gelembung gas menempel pada partikel alga. Gelembung yang menempel pada alga ini kemudian membantu partikel-partikel menuju ke permukaan air dan kemudian dapat di ambil dengan proses skimming. Keterangan lebih lanjut mengenai penelitian pada elektro-flokulasi akan disajikan pada sub bab 5.3.7.

### 5.3.5.3 Flokulasi dengan Udara Terdispers

Mengumpulkan udara yang tidak bertekanan pada tangki flokulasi dapat memberikan sebuah alternatif penggunaan DAF. DAF dapat dimodifikasi dengan mengkombinasikan agitasi serta injeksi udara untuk membentuk gelembung. Factor-faktor seperti laju aerasi, pH suspense alga dan temperatur operasi sangat mempengaruhi efisiensi pembentukan gelembung proses floatasi (Phoochinda and White, 2003; Phoochinda et al., 2004). *Scenedesmus quadricauda* digunakan untuk studi flotasi dengan udara terdispers. Surfaktan seperti Cetyl trimethyl ammonium bromide (CTAB) dan Sodium dodecylsulfate (SDS) juga ditambahkan untuk meningkatkan efisiensi separasi. Pemanenan alga dengan konsentrasi tinggi menggunakan CTAB (90%) jika dibandingkan dengan SDS (16%). Efisiensi pemanenan dapat ditingkatkan sampai 80% dengan menyesuaikan pH suspense alga. Hasil penelitian dari Golueke and Oswald (1965) menyebutkan bahwa hanya beberapa reagen (2 dari 18) dapat memberikan efisiensi yang tinggi. Studi yang lain menyebutkan bahwa flotasi dengan udara terdispers sebagian besar dipengaruhi oleh pH pada medium (Levin et al., 1962). Batas pH kritikal tercatat 4.0, yang mana ditandai dengan perubahan karakteristik permukaan alga.

### 5.3.5.4 Flotasi Ozon

Beberapa hasil penelitian tentang efek dari flotasi ozon untuk pemanenan alga (Betzer et al., 1980; Benoufella et al., 1994; Jin et al., 2006; Cheng et al., 2010, 2011). Gas ozon mengubah permukaan sel alga yang mana memicu mengambanginya sel dan menghasilkan suatu senyawa yang membantu terjadinya pengapungan. Studi pilot plant telah dilakukan dengan menggunakan flotasi ozon pada *Microcystis* (Benoufella et al., 1994). Beberapa aspek seperti sifat oksidasi pada ozon dan sifat

## BIOREFINERY Microalga

pengapungan dari sel telah diteliti. Hasilnya adalah ozon menyebabkan inaktivasi pada sel. Flotasi ozon dengan bantuan dari koagulan flokulasi didapati sebagai proses yang efisien untuk melucuti *Cyanobacteria*. Koagulan yang paling potensial dalam kasus ini adalah Ferric chloride. Preozonisasi juga mempengaruhi efisiensi dari proses koagulasi. *Scenedesmus obliquus* FSP-3, merupakan spesies yang mumpuni dalam potensinya untuk menangkap CO<sub>2</sub> dan produksi lipid, alga ini dipanen menggunakan flotasi ozon terdispersi. Ozon menghasilkan separasi padat-cair dengan pengapungan dimana tidak dapat dilakukan oleh udara biasa (Cheng et al., 2011). Banyaknya ozon yang diperlukan untuk memanen alga sama dengan kebutuhan ozon untuk pemurnian air. Pada saat ozonasi, laju pelucutan alga, muatan permukaan, dan hidropobisitas dari sel alga serta karakteristik fluoresensi, kandungan protein, polisakarida pada *algogenic organic matter* (AOM) ditetapkan. Protein yang keluar dari AOM merubah hidropobisitas dari permukaan gelembung sehingga menyebabkan pembentukan lapisan buih yang mana membantu dalam pemanenan mikroalga. Senyawa humic pada suspensi *scavenge* ozon menghambat efisiensi flotasi ozon pada sel alga.

### 5.3.6 Sentrifugasi

Sentrifugasi dapat di jelaskan dengan hukum Stokes, yang mengatakan bahwa laju sebanding dengan perbedaan densitas antara sel dan medium di satu sisi dan luasan dari radius sel (radius Stokes) pada sisi yang lain. Akan tetapi hukum ini susah untuk diterapkan pada metode gaya tarik gravitasi di bakteri, tetapi untuk yeast dan mikroalga dengan diameter >5  $\mu\text{m}$  dan pada dinding sel yang relatif tebal masih dapat untuk diterapkan. Tingginya biaya operasi dalam pemakaian sentrifugasi menggugurkan semua poin positif yang dijanjikan pada metode ini. Tes sentrifugasi skala laboratorium telah dilakukan pada efluen kolam dengan 500 – 1000 g dan menyajikan 80% – 90% mikroalga dapat dipisahkan dengan rentang waktu 2-5 menit (Molina Grima et al., 2003). Sentrifugasi analog dengan tangki sedimentasi, akan tetapi perbedaan pada sentrifugasi laju pemisahan partikel tersuspensi dipercepat dengan gaya sentrifugasi yang lebih besar jika dibandingkan dengan gaya gravitasi. beberapa alat sentrifugasi telah diteliti untuk diaplikasikan pada pemisahan alga (Mohn and Soeder, 1978, 1980; Moraine et al., 1980; Shelef et al., 1980, 1984).

Beberapa diantaranya sangat efisien dengan hanya memerlukan satu tahap proses separasi dan beberapa yang lain ditemui tidak efisien atau memerlukan umpan sluri yang pekat. Hal yang membuat sentrifugasi kurang menarik juga adalah, sentrifugasi hanya bisa dilakukan dengan operasi batch dimana perlu adanya penghentian operasi untuk mengambil solid yang terkumpul. Ditambah lagi Knuckey et al. (2006) menyatakan bahwa struktur sel mikroalga dapat rusak jika dikenakan gaya gravitasi ataupun gaya tekan yang besar. Berdasarkan Molina Grima et al. (2003), sentrifugasi disarankan khususnya untuk memproduksi konsentrat aquakultur dengan shelf-life yang lebih lama; akan tetapi mereka juga menyatakan bahwa metode ini banyak memakan waktu dan membutuhkan biaya yang banyak. Energy yang disarankan untuk sentrifugasi  $1 \text{ kW h}^{-1} \text{ m}^{-3}$ .

#### **5.3.6.1 Sentrifugasi Solid-Bowl Decanter**

Sentrifugasi ini berbentuk mangkuk kerucut yang melintang horizontal yang berisi screw conveyor yang berputar dengan arah yang sama. Sluri umpan masuk pada bagian tengah dan tersentrifugasi menuju dinding mangkuk. Padatan yang terkumpul kemudian terpindahkan oleh screw conveyor menuju ke bagian ujung mangkuk yang kemudian dikeluarkan, sementara air yang terpisah membentuk lapisan dalam yang terkonsentrasi yang mengalir menuju penampung. Screw conveyor yang menekan sluri yang masuk bekerja dengan kecepatan rotasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan kecepatan rotasi dari mangkuk. Sentrifugasi jenis ini telah digunakan untuk memisahkan berbagai jenis alga (Mohn, 1980). 22% konsentrasi solid didapatkan pada pemisahan alga dengan umpan masuk yang konsentrasi suspensi solidnya 2%. Walaupun reliabilitas dari sentrifugasi ini terkesan sempurna, energi yang dibutuhkan sangatlah tinggi. Percobaan untuk memekatkan umpan alga dengan 5.5% solid yang berasal dari proses flotasi dengan co-current sentrifugasi solid-bowl decanter tidak membuahkan hasil yang diinginkan (Shelef et al., 1980). Akan tetapi setelahnya, konsentrasi pada percobaan selanjutnya meningkat sampai 21% w/v TSS dengan mengurangi kecepatan screw conveyernya menjadi 5 rpm (Shelef et al., 1984). Sentrifugasi solid-bowl decanter direkomendasikan dengan pemakaian koagulan polielektrolit secara bersamaan untuk meningkatkan efisiensinya (Shelef et al., 1984).

### 5.3.6.2 Sentrifugasi Nozzle

Output sluri solid secara yang berkelanjutan dapat dilakukan dengan menggunakan sentrifugasi nozzle disc ini. Bentuk dari mangkuknya telah dimodifikasi sedemikian rupa sehingga ruang pada sluri memiliki bagian yang kerucut yang memberikan cukup ruang dan memungkinkan cake yang keluar mengalir secara lancar (Shelef et al., 1984). Dinding mangkuk miring terhadap area sekelilingnya yang terdapat nozzle-nozzle yang sejajar. Banyak dan ukuran dari nozzle disesuaikan sehingga tidak terjadi penumpukan cake dan mendapatkan output dengan konsentrasi biomasa alga yang optimal. Penelitian tentang pengaruh diameter nozzle terhadap flow rate, efisiensi pemisahan alga dan konsentrasi resultan sluri pada peggaplikasian alat sentrifuge tipe nozzle disc untuk pemanenan alga telah dilakukan (Golueke dan Oswald, 1965). Jika dibandingkan dengan metode pemanenan lain, hasil yang didapat dari sentrifuge tipe nozzle ini terkesan menjanjikan, walaupun tidak begitu menarik dikarenakan membutuhkan daya dan biaya yang besar. Pada studi lain, sentrifugasi ini didapati lebih efektif dalam pemanenan *Scenedesmus* daripada *Coelastrum* (Mohn and Soeder, 1978, 1980). Dengan memasukkan kembali output hasil sentrifuge ke dalam feed, kandungan solid pada suspense alga (0.1%) dapat di pekatkan lagi hingga 15-150%. Hasil tersebut dapat dicapai selama penyumbatan pada nozzle tidak terjadi.

### 5.3.6.3 Sentrifugasi Solid Ejecting Disc

Sentrifugasi solid ejecting disc menghasilkan keluaran solid yang berselang-seling dengan pengaturan kontrol valve oleh pengatur waktu atau alat penggerak otomatis. Kelebihan dari sentrifugasi ini dalam pemanenan alga adalah kemampuannya untuk menghasilkan cake alga dalam satu tahap tanpa penambahan bahan kimia (Mohn and Soeder, 1978, 1980; Shelef et al., 1984). Sentrifuge ini memekatkan berbagai jenis mikroalga secara efektif, dengan hasil cake alga mencapai 12-25% solid (Mohn, 1980 ; Moraine et al., 1980). Hasil output dari pemisahan suspensi alga dapat ditingkatkan dengan meningkatkan waktu tinggal (mengurangi laju umpan), sedangkan konsentrasi cake keluar dipengaruhi oleh interval antar desludging (Shelef et al., 1984). Sentrifugasi ini didapati sangat handal tetapi kekurangan dari sentrifugasi ini adalah padatan yang lebih kecil daripada alga

mungkin tidak dapat tersaring dan terikut dalam aliran, yang mana mengurangi efisiensi pemisahan (Moraine et al., 1980). Tingginya biaya yang dibutuhkan disertai dengan biaya energinya membuat metode separasi ini tidak begitu menarik.

### **5.3.7 Teknik Elektroforesis, Elektroflotasi dan Elektroflokulasi**

Metode elektrolitik merupakan metode pendekatan lain yang potensial untuk memisahkan alga tanpa memerlukan penambahan bahan kimia. Pada metode ini, medan elektrik menggerakkan alga yang bermuatan untuk keluar dari larutan (Mollah et al., 2004). Elektrolisis air menghasilkan hydrogen yang mana menempel pada flok-flok mikroalga dan membawanya menuju ke permukaan. Mekanisme Elektrokoagulasi melibatkan tiga tahapan berikut:

- Generasi koagulan oleh oksidasi elektrolitik pada elektroda
- Destabilisasi suspensi partikulat dan pemecahan emulsi
- Agregasi setelah fase Destabilitas dan pembentukan flok-flok.

Pendekatan dalam pemekatan alga secara elektrik melibatkan teknik elektroforesis, elektro flokulasi dan elektro flotasi. Dengan menggunakan pelarut air, elektroforesis dan elektro flokulasi dapat terjadi dengan bersamaan dengan set perlakuan keadaan yang sama. Jika tempat pertumbuhan alga telah dipaparkan medan listrik dengan menempatkan elektroda metal pada kedua tempat dan dialiri dengan listrik DC, akan terbentuk pemekatan alga pada kedua elektroda (elektroforesis) dan juga pada bagian bawah tray (elektro flokulasi). Penelitian yang terfokus pada factor-faktor yang mempengaruhi elektroforesis dan elektro flokulasi pada alga dengan media pertumbuhannya memberikan hasil yang menunjukkan bahwa elektroforesis dapat terjadi, akan tetapi terganggu oleh pergerakan fluida yang terjadi (Pearsall et al., 2011). Hal tersebut menunjukan bahwa pelarutan sel alga dengan fluida mediumnya bias sangat kuat sehingga efek pergerakan fluida dapat mempengaruhi dan mendominasi kelakuan dari alga. Elektroflokulasi terlihat sebagai proses yang kuat (Azarian et al., 2007). Akan tetapi, proses ini meninggalkan flokulan dengan sisa metal yang terinduksi secara elektrik pada hasil alga. Pada elektro flotasi atau elektrolitik flotasi, gelembung halus yang berupa hydrogen akan terbentuk saat proses elektrolisis yang mana menyebabkan partikel

## BIOREFINERY Microalga

alga mengapung menuju permukaan dan selanjutnya dapat dilakukan proses pemisahan. Penelitian tentang efisiensi pengaplikasian system elektro flotasi skala laboratorium menggunakan magnesium hidroksida yang terbentuk karena proses elektrolisis sehingga membentuk endapan dan oleh karenanya terbentuk flokulasi telah dilakukan (Contreras et al., 1981). Skala laboratorium dan skala Lapangan dari unit elektro flotasi untuk pemisahan alga dari air limbah juga telah diteliti (Sandbank et al., 1974 ; Kumar et al., 1981). Telah dilakukan pengujian pada unit skala pilot dengan ukuran 2 m<sup>3</sup> untuk penjernihan kolam efluen dengan laju oksidasi tinggi (Shelef et al., 1984). Dalam rangka untuk mendapatkan hasil yang memuaskan dalam pemisahan alga, elektro flotasi dilakukan bersamaan dengan flokulasi menggunakan alum (Sandbank et al., 1974).

Penelitian yang mengkaji pemisahan mikroalga dari limbah cair industry menggunakan aliran berlanjut elektro-koagulasi telah dilakukan (Azarian et al., 2007). Berbeda dengan koagulan elektrolitik, elektrolitik flokulasi tidak memerlukan elektroda. Elektrolitik flokulasi bekerja berdasarkan pergerakan mikroalga ke anoda untuk menetralkan muatan dan kemudian berkumpul membentuk agregat. Efisiensi pemisahan dengan metode ini berkisar 80-95% (Poelman et al., 1997). Terdapat beberapa keunggulan dalam penggunaan metode elektrokimia ini, mulai dari berkesesuaian terhadap lingkungan, keserbagunaan, efisiensi energi, keamanan, selektifitas, dan biaya (Mollah et al., 2004). Penelitian tentang pemisahan mikroalga secara elektrolitik pada reactor batch dan continuous dengan flotasi telah dilakukan. Hasil yang di dapat pada sistem batch, dengan ditingkatkannya daya listrik yang masuk laju pemisahan chlorophyll meningkat dan waktu elektrolisis berkurang (Alfajara et al., 2002). Geo et al. (2010a, b) melakukan penelitian tentang pemisahan alga dengan electro-coagulation-flotation (ECF) dan mengindikasi bahwa aluminium merupakan elektroda terbaik untuk pemisahan alga jika dibandingkan dengan besi. Parameter optimal yang didapat ialah densitas arus listrik = 1mA cm<sup>-2</sup>, pH = 4-7, suhu air = 18-36 °C, densitas alga = 0.55×10<sup>9</sup> - 1.55×10<sup>9</sup> sel L<sup>-1</sup>. Pada kondisi optimal, 100% alga dapat dipisahkan dengan konsumsi energi yakni 0.4 kW m<sup>-3</sup>. ECF bekerja baik pada suasana asam maupun netral. Pada pH rendah 4-7, densitas sel alga dapat dipisahkan secara efektif dengan ECF, umumnya dengan mekanisme penetralan muatan; akan tetapi pemisahan alga menurun dengan meningkatnya pH



(7-10), dengan perubahan mekanisme menjadi pengendapan metal dan bercampur dengan floc-flok alga.

Selanjutnya, densitas sel dan temperature air juga dapat mempengaruhi pemisahan alga. Secara keseluruhan, hasil yang didapatkan dari teknologi ECF ini sangat efektif dalam pemisahan alga, baik dari segi teknikal maupun dari ekonomi (Gao et al., 2010a, b). baru-baru ini, perusahaan OriginOil memperkerjakan beberapa teknologi terdepan untuk menunjang kultivasi alga dan ekstraksi minyak (OriginOil, 2010), dengan terfokus pada pengendalian pemanenan dan siklus ekstraksi minyak pada kecepatan tinggi, terus menerus, dan produksi minyak alga industrial yang efisien. Pada prosesnya, alga siap panen di masukkan kedalam alat dari OriginOil, dimana Quatum Fracturing™, mengeluarkan gelombang medan elektromagnetik dan modifikasi pH (dengan CO<sub>2</sub>) untuk membuka dinding sel, sehingga minyak dapat keluar dari dinding sel. Proses pemanenan selanjutnya beralih pada tangki pengendapan, atau penjernihan dengan gravitasi, untuk memisahkan secara sempurna minyak air dan biomasa. Minyak alga bertambah pada bagian atas yang kemudian dilakukan skimming dan pemurnian, sedangkan biomasa yang mengendap di bawah dilakukan proses lebih lanjut untuk dijadikan sebagai bahan bakar dan produk lain yang bernilai jual (OriginOil, 2010).

### **5.3.8 Metode Ultrasonik**

Aplikasi Teknik ultrasonik dalam pemanenan mikroalga dengan skala laboratorium sudah dilakukan (Bosma et al., 2003). Proses separasi alga berdasar pada agregasi yang diinduksi secara akustik dengan diikuti oleh sedimentasi yang ditingkatkan. Efisiensi yang lebih dari 90% pada biomasa berkonsentrasi tinggi telah tercatat dengan laju alir antara 4 sampai 6 liter per hari. Sebanyak 92% biomasa alga dapat dipanen dengan faktor konsentrasi 11. Percobaan untuk pemanenan pada efisiensi yang lebih tinggi tidak membuahkan hasil dikarenakan ukuran yang kecil dan densitas yang rendah dari mikroalga. Laju alir umpan, konsentrasi biomasa dan rasio aliran antara hasil panen dengan umpan memiliki efek yang sangat signifikan pada faktor konsentrasi. Penelitian tentang penggunaan ultrasonik untuk meningkatkan pemisahan koagulan *M. Aeruginosa* spesies alga beracun yang umum dijumpai telah dilakukan (Zhang et al., 2009). Hasil yang didapat menunjukkan

## BIOREFINERY Microalga

bahwa sonikasi meningkatkan penurunan secara signifikan alga sel, *solution UV 254*, dan *chlorophyll-a* tanpa meningkatkan konsentrasi dari microcystin akuatik. Mekanisme utama dari metode ini meliputi pengrusakan saat iradiasi ultrasonik pada gas vakoules yang berada di dalam sel alga yang berperan sebagai 'nuclei' untuk kultivasi akustik dan pecah pada saat periode "*bubble crush*", menghasilkan pengendapan dari cyanobacteria. Pada penelitian ini menunjukkan efisiensi koagulan tergantung pada dosis koagulan yang digunakan dan kondisi pada saat sonikasi. Dengan dosis koagulan  $0.5 \text{ mg L}^{-1}$  dan iradiasi ultrasonik 5 s, efisiensi pemisahan alga meningkat dari 35% menjadi 67%. Sehingga disimpulkan bahwa sonikasi optimalnya 5 s, jika dilakukan sonikasi lebih dari 5 s hanya akan didapati peningkatan efisiensi koagulan yang tidak signifikan. Intensitas sonikasi yang paling efektif tercatat pada  $47.2 \text{ W cm}^{-2}$ , dengan pemisahan alga paling tertinggi yaitu 93.5%.

## REFERENSI

- Amini, S. dan Susilowati, R. 2010. Produksi biodiesel dari mikroalga *Botryococcus Braunii*. *Squalen* 5(1) :23-32.
- Antoni, D., Zverlov, V.V., and Schwarz, H. 2007. Biofuels from microbes. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 77: 23– 35.
- Assadad, L., Utomo, B.S.B., Sari, R.N. 2010. Pemanfaatan mikroalga sebagai bahan baku bioethanol. *Squalen (5) 2: 51-58*.
- Borowitzka MA,1999, Pharmaceuticals and agrochemicals from microalgae. In: Cohen Z,editor. Chemicals from Microalgae. Taylor &Francis:p: 313-352.
- Brown, M.R. 2002. Nutritional value of microalgae for aquaculture. In Cruz-Suárez, L. E., Ricque-Marie, D., Tapia-Salazar, M., Gaxiola-Cortés, M. G., Simoes, N. (Eds.). *Avances en Nutrición Acuícola VI. Memorias del VI Simposium Internacional de Nutrición Acuícola; 3 al 6 de Septiembre del 2002*. Cancún, Quintana Roo, México. p. 281–292.
- Gao, Y., Gregor, C., Liang, Y., Tang, D., and Tweed, C. 2009. *Algae Biodiesel. A Feasibility Report on BPRO 29000*. 43 pp.
- Guerrero, M.G. 2010. Bioethanol from microalgae?. Instituto Bioquímica Vegetal y Fotosintética, Sevilla.[http://www.slideshare.net/slides\\_eoi/bioethanol-from-microalgae-3718018](http://www.slideshare.net/slides_eoi/bioethanol-from-microalgae-3718018). Diakses pada tanggal 28 Juni 2018.
- Hadiyanto dan Azim, M. 2012. Mikroalga: Sumber Pangan dan Energi Masa Depan Edisi Pertama. UPT UNDIP Press: Semarang.
- Harun, R., Danquah, M.K., and Forde, G.M. 2009. Microalgal biomass as a fermentation feedstock for bioethanol production. *Journal of Chemical*

## BIOREFINERY Microalga

*Technology & Biotechnology*. 85 (2): 199–203.

Harun, R., Singh, M., Forde, G.M., and Danquah, M.K. 2010. Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products. *Renewable and Sustainable Energy Review*. 14: 1037–1047.

Ingram, L.O. and J.B. Doran. 1995. Conversion of cellulosic materials to ethanol. *FEMS Microbiol. Review*. 16: 235–241.

J.P., Leak, D.J., Liotta, C.L., Mielenz, J.R., Murphy, R., Templer, R., and Tschaplinski, T. 2006. The path forward for biofuels and biomaterials. *Science* 311: 484–489.

Lavens, P. and Sorgeloos, P. 1996. Manual on the production and use of live food for aquaculture. FAO, Rome. 361 pp.

Maynell, B. 1981. Research of Methane in Biogas Production. *Journal of Science and Technology*. Volume (19):388.

Patil, V., Tran, K.Q., and Gislerod, H.R. 2008. Towards sustainable production of biofuels from microalgae. *Int. J. Mol. Sci*. 9: 118 –1195.

Pitman, J.K., Dean, A.P., Osundeko, O. 2011. Potensi Produksi Berkelanjutan Biofuel dari Alga Menggunakan Limbah Cair. <http://mayangsunnyoto.lecture.ub.ac.id/2012/01/potensi-produksi-berkelanjutan-biofuel-dari-alga-menggunakan-limbah-cair/> diakses pada tanggal 5 Juli 2018.

Ragauskas, A.J., Williams, C.K., Davison, B.H., Britovsek, G., Cairney, J., Eckert, C.A., Frederick, W.J., Hallett, resource for biodiesel production. *The Biol. (E-Journal of Life Sciences)* 1 (1): 16–23.

Richmond A.2004. Biological principles of mass cultivation. In: Richmond A, editor: *Handbook of microalgae culture : Biotechnology and applied phycology*. Blackwell.p:125-177.

Santhanam, N. 2010. Ethanol from algae. [http:// www.oilgae.com/algae/pro/eth/eth.html](http://www.oilgae.com/algae/pro/eth/eth.html). Diakses pada tanggal 5 Juli 2018.

Shahzad, I., Hussain, K., Nawaz, K., and Nisar, M.F. 2010. *Review algae as an alternative and renewable*

Taylor, J.J., Southgate, P.C., Wing, M.S., and Rose, R.A. 1997. The nutritional value of five species of microalgae for spat of the Silver-Lip Pearl Oyster, *Pinctada maxima* (Jameson)(*Mollusca: Pteriidae*). *Asian Fisheries Science*. 10: 1–8.

- Vonshak and G. Torzillo, 2004, Environmental stress physiology. In: A. Richmond, Editor, *Handbook of Microalgal Culture*, Blackwell Publishers, Oxford , pp. 57–82.
- Widjaja, A. 2009. Lipid production from microalgae as a promising candidate for biodiesel production. *Makara Teknologi*. 13(1): 47–51.
- Yuliandri, F., Utama, Y.U, dan Buchori, L. 2013. Biofiksasi CO<sub>2</sub> oleh mikroalga *Spirulina* sp dalam upaya pemurnian gas. *Jurnal Teknologi Kimia dan Industri* 2(4): 125-131.
- Zhang, Y., Dube, M.A., McLean, D.D., and Kates, M. 2003. Biodiesel production from waste cooking oil: process design and technological assesment. *Biosource Technology*. 89: 1–16.